

**HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI**

Pro gradu -tutkielma
Geofysiikka

ADCP:n ja aaltopoiijun käyttäminen aallokko- ja pintavirtaushavainnoissa

Heini Jalli

Elokuu 2020

Ohjaaja: FT Laura Tuomi

Tarkastajat: Professori Petteri Uotila
FT Laura Tuomi

HELSINGIN YLIOPISTO
ILMAKEHÄTIETEIDEN OSASTO

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Ilmakehätieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author			
Heini Jalli			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
ADCP:n ja aaltopoijun käyttäminen aallokko- ja pintavirtaushavainnoissa			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Pro gradu -tutkielma		Elokuu 2020	57 sivua
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Aallokon mittaamiseen Itämerellä on vakiintunut käytettäväksi aaltopoiju, joka on ankkuroitava pintapoiju. Kyseinen havaintotapa aiheuttaa mittauskauden lyhenemistä jäätalven vuoksi. Jotta mittauskautta pystyttäisiin pidentämään, tarvitaan mittausysteemi, jota ei tarvitse nostaa ylös vedestä ennen jäätalvea. Pintavirtauksia mitataan yleisesti pohjaan asennettavilla akustisilla Doppler virtaus profiilimittalaitteilla (ADCP), joissa ei ole reaaliaikaista tiedonsiirtoa. Viimeisten vuosien aikana lähes reaaliaikaista aineistoa lähettävään aaltopoijuun on lisätty pintavirtauksen havainnoinnin mahdollistavat anturit. Tässä tutkielmassa arvioidaan ADCP:n havaintojen luotettavuutta aallokon mittaamisessa verrattuna aaltopoijuun ja vertaillaan aaltopoijun ja ADCP:n virtaushavainnoja toisiinsa.</p> <p>Tässä tutkielmassa käytetty havaintoaineisto on saatu kahden eri vuoden, kesien 2017 ja 2018, aikana toteutetuista mittalaittevertailuista. Mittausjaksot tehtiin Suomenlahdella Hankoniemen itäpuolella. Havaintoaineistolle on tehty laadunvarmistusta ennen kuin niitä on vertailtu. Laaduntarkastuksen kriteerit on saatu mittalaitteiden valmistajien ilmoittamista raja-arvoista, suosituksista ja kirjallisuudessa olevista Suomenlahden aallokko-olosuhteiden raja-arvoista. Havaintoaineistoa on analysoitu ja verrattu toisiinsa aikasarjojen, hajontakuvaajien ja tilastollisten arvojen kautta.</p> <p>ADCP:n ja aaltopoijun merkitsevän aallonkorkeuden vastaavuus on hyvä, mutta ADCP ei pysty havaitsemaan alle 0,5 metrin aallokkoa luotettavasti. Syvemmälle asennettu ADCP aliarvioi suhteellisen systemaattisesti merkitsevää aallonkorkeutta verrattuna aaltopoijun havaintoihin. Aliarviointia on teoriassa mahdollista korjata ja näin parantaa mittauksien vastaavuutta, mutta käytännössä se ei ole järkevää koska se vaatisi uusien vertailujen tekemistä muuan muassa jokaiselle mittalaitteelle ja -paikalle. Huipun periodin ja aallokon suunnan vastaavuus ei ollut tilastollisesti merkittävää ja ADCP:n mittauksia näistä suureista voisi käyttää, tarvittaisiin tarkempaa spektrien analysointia. Aaltopoijun ja ADCP:n pintavirtaushavainnoja vertaillen on vastaavuutta arvojen välillä, mutta aallokon kasvaessa erot mittauksissa kasvavat. Havaittuja eroja ei voi selittää pelkästään vertailtujen laitteiden mittaussyvyyden erolla, joka oli keskimäärin 1 metri.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
aallokko, virtaukset, ADCP, aaltopoiju			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

Sisältö

1	Johdanto	1
1.1	Aallokon ja virtausten fysiikkaa	6
2	Materiaalit ja menetelmät	7
2.1	Havaintolaitteet	7
2.1.1	ADCP	7
2.1.2	Aaltopoiju	11
2.2	Mittaustavat	13
2.2.1	Aallokko	16
2.2.2	Virtaukset	19
2.3	Laaduntarkastus	21
3	Tulokset ja keskustelu	24
3.1	Aallokko	24
3.1.1	Merkitsevä aallonkorkeus	24
3.1.2	Huipun periodi	28
3.1.3	Merkitsevä aallonkorkeus ja huipun periodi	32
3.1.4	Aallokon suunta	35
3.1.5	Tilastolliset arvot	39
3.2	Virtaukset	43
3.2.1	Virtauksen voimakkuus	43

3.2.2	Virtauksen suunta	46
3.2.3	Tilastolliset arvot	49
4	Yhteenveto	52
	Kiitokset	55
	Kirjallisuus	56

1. Johdanto

Aallokolla ja virtauksilla on merkitys merenkululle, merien ekosysteemeille, rannikon läheiselle infrastruktuurille, virkistyskäytölle ja näiden kautta koko yhteiskunnalle. Historiallisesti ihmiskunta on rakentanut yhteiskuntansa merien rannikoille ja muiden vesistöjen varsille, koska nämä vesiväylät ovat toimineet materiaalien ja ihmisten kuljetusväylinä. Nykypäivänäkin suurin osa maailman rahdista kulkee vesiteitse joissain vaiheessa kuljetusketjua tuottajalta käyttäjälle.

Aallokkomittauksiin käytetään nykyään sekä ankkuroitavia mittalaitteita, että kaukokartoitusmetodeja. Perinteisesti aallokkoa on mitattu 1970-luvulla käyttöön tulleilla veden pinnalla olevilla aaltopoijuilla ja paineantureilla (Joosten, 2013). Näiden mittalaitteiden rinnalle on tullut akustinen doppler-profiilivirtausmittalaite ja kaukokartoitusmenetelmät.

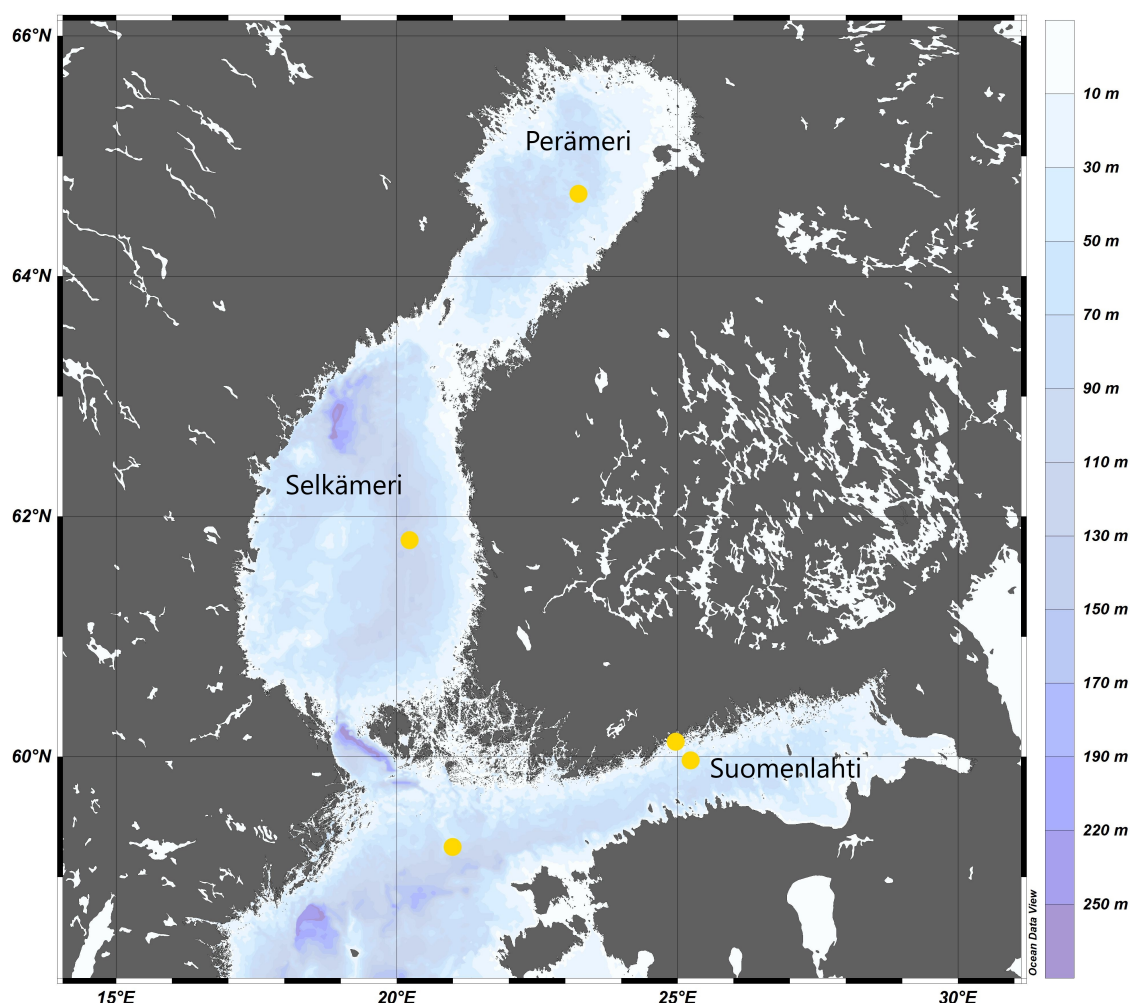
Itämerellä veden pinnalla olevan aaltopoijun rajoittava tekijä on Itämeren jäätalvi. Jäätä esiintyy Itämerellä tyypillisesti marraskuusta toukokuun loppupuolelle. Leutoina talvina jäätä esiintyy Perämerellä, Merenkurkussa, Selkämeren rannoilla ja Suomenlahden pohjukassa (Kuva 1.1). Normaaleina talvina jäätyvät Perämeri, Merenkurkku, suurin osa Selkämerestä, Suomenlahti, Saaristomeri, alueita pohjoisesta Itämerestä ja Itämeren rannikkoalueet. Ankarina talvina jäätymistä tapahtuu edellä mainittujen alueiden lisäksi varsinaisella Itämerellä ja Tanskan salmissa asti. Jään liike mitä suurimmalla todennäköisyydellä vaurioittaisi poijuja. Tästä johtuen poijut pitää nostaa ylös vedestä ennen jäiden tuloa ja tämä lyhentää mittauskautta erityi-

sesti Perämerellä. Jäätalven kesto ja jääpeitteen laajuus vaikuttavat siihen, mitkä poijut pitää nostaa ylös ja milloin. Viime vuosina poijut on tarvinnut nostaa ylös yleensä Perämerellä, Helsingin edustalla ja Suomenlahdella. Pohjaan sijoitetun mittalaitteen etuna on, että sitä ei tarvitse nostaa vaikka mittauspaikalla olisi jääpeite. Vaikka itse laitteelle ei aiheudu ongelmia jääkannesta, niin reaaliaikainen tiedonsiirto olisi mitä todennäköisimmin toteutettava pintapoijulla, sillä halutut mittapaikat ovat kaukana rannasta ja vedenalaisen kaapelin vetäminen olisi aivan liian kallista. Joten vaikka jääkannen muodustuminen Itämerellä ei haittaisi itse mittauksia, niin se vaikuttaisi reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon, mutta ratkaisut reaaliaikaisen tiedonsiirron toteuttamiseen ovat tämän tutkielman laajuuden ulkopuolella.

Ilmatieteen laitoksen toimesta nykyään Itämerellä virtauksia havainnoidaan pääasiallisesti kiinteästi pisteissä olevien akustisten mittalaitteiden avulla, koska kaukokartoitusmenetelmät eivät pysty havainnoimaan aivan meren pintakerrosta syvemmälle. Aikaisemmin käytettiin mekaanisia virtausmittareita joiden tarkkuus ja reagointikyky oli rajoitettu. Nykyään käytetyt akustiset doppler-laitteet tulivat käyttöön 1990-luvulla. Itämerellä on tehty virtausmittauksia 1900-luvun alusta lähtien (Witting, 1912; Virtaustutkimuksen neuvottelukunta, 1979), ensin mittauksia tehtiin majakkalaivoilta ja sen jälkeen erilaisia tutkimuskysymyksiä ja tilaustutkimuksien tarpeita varten.

Mittauksia on tehty mekaanisilla mittalaitteilla Saaristomerellä ja Loviisan ydinvoimalan edustalla (Alenius, 1983; Korhonen, 1971). Akustisilla mittalaitteilla on tehty mittauksia Suomenlahdella, Saaristomerellä, Märketin ja Utön edustalla.

Aallokonkorkeutta on mitattu Suomen vesialueilla 1970-luvulta alkaen aaltopoijuilla (Tuomi et al., 2011). Alkuun mittauksia tehtiin lähinnä tutkimustarkoituksiin sekä osana konsultointitöitä. Vasta vuodesta 1996 lähtien, mittauksia on tehty jatkuvatoimisesti ja reaaliaikaisesti Pohjoisella Itämerellä. Yksi syy mittauksien aloittamiselle oli MS Estonian uppoaminen alueella 1994 (Joosten, 2013).



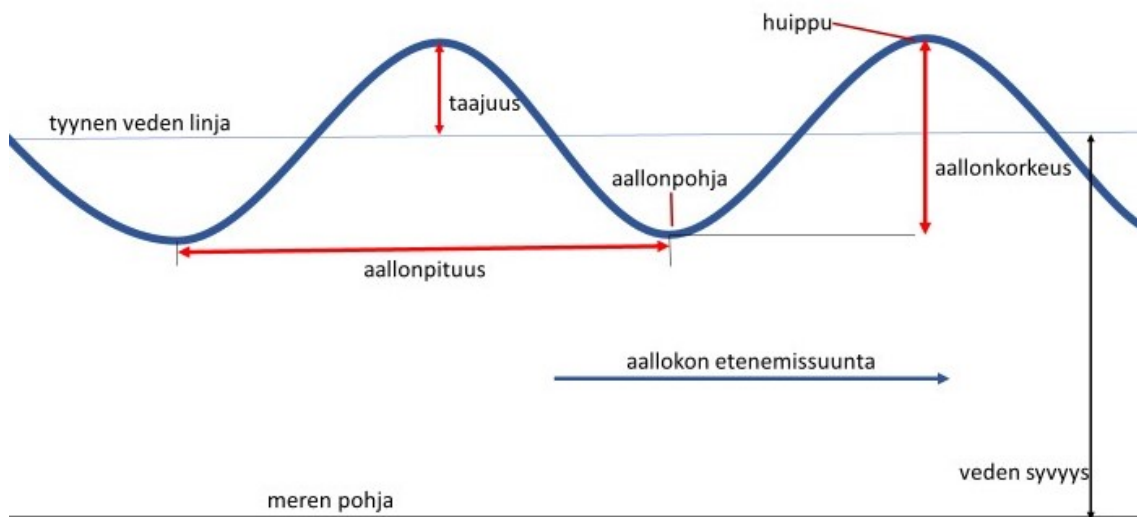
Kuva 1.1: Havainnekuva Ilmatieteen laitoksen viidestä vakituisesta aallonmittauspaikasta Itämerellä. Keltaiset pallot merkitsevät kartalla aaltopoijujen mittauspaikkoja. Tieto mittauspaikoista on saatu Ilmatieteen laitoksen havaintoaineistosta. Kuva on tehty Ocean Data View ohjelmalla (Schlitzer, 2019)

Nykyään Ilmatieteen laitoksella vakituisia aallokon mittauspaikkoja on viisi ja ne ovat varsinaisen Itämeren pohjoisosa, Suomenlahti, Selkämeren keskiosa, Perämeri ja Helsingin edustalla Suomenlinnan eteläpuolella (Kuva 1.1). Suurin osa paikoista on avomerialueilla, ainoastaan Suomenlinnan poiju on lähellä rannikkoa. Lyhytaikaisempia aallokkomittauksia erilaisia tutkimuskysymyksiä varten on tehty myös muualla Suomen rannikolla ja Itämerellä.

Tämän tutkielman tarkoituksena on verrata Datawellin aaltopoijujen mittaa-

mia aallokko- ja virtaushavaintoaineistoja akustisten dopplermittalaitteiden aallokko- ja virtaushavaintoaineistoon. Tarkoitus on selvittää pystyvätkö kyseiset akustiset dopplermittalaitteet havainnoimaan aallokkoa luotettavasti. Lisäksi tutkitaan, millä resoluutiolla ja miten mittalaitteiden asennussyvyys vaikuttaa havaintoihin ja niiden laatuun.

Tässä tutkielmassa käytettyjen havaintoaineistojen saamiseksi käytettyjä laitemalleja ei ole aikaisemmin vertailtu aallokko- ja virtausmittauksien osalta Itämerellä, mutta osittain samojen valmistajien vanhempien mallien aallokkohavaintoja on verrattu toisiinsa tutkielmassa Haavisto, 2015. Maailmalla vanhempia akustisia Doppler-virtausprofiilimittalaittemalleja on verrattu paineanturisysteemeihin ja poi-juihin (E. Terray et al., 1997; E. A. Terray et al., 1999; Rorbaek ja Andersen, 2000; Strong et al., 2000; Work, 2008). Suurin osa näistä vertailuista on tehty matalammissa olosuhteissa (7,5 - 17 metriä) ja vuorovesi alueilla (1,5 metriä), joten ne eivät ole suoraan verrannollisia syvemmän veden tilanteeseen. Vain Strong et al., 2000 artikkelissa on osittain tarkasteltu syvämmässä vedessä olevia laitteita ja verrattu niitä pintapoijun mittauksiin.



Kuva 1.2: Aallon ominaisuudet.

Vertailuissa on todettu, että akustiseen doppler-teknologiaan perustuvien laitteiden merkitsevän aallonkorkeuden vastaavuus on hyvä paine- ja pintapoijusysteemien havaintoihin. Aallon periodin ja suunnan vastaavuudessa on isompia eroja, mutta keskimääräisen periodin ja suunnan vastaavuus on vertailujen mukaan parempi (Kuva 1.2). Strong et al., 2000 mukaan myös huipun periodin vastaavuus on hyvä ja erot johtuvat lähes aina eri huippujen valinnasta, kun on useita lähes samankokoisia spektrimaksimeja.

Aaltopoijujen virtaussensorit ovat suhteellisen uusi lisäys Datawellin mallistoon, joten virtaushavainnoista ei ole aikaisemmin tehty vertailumittauksia Itämerellä. Akustiset dopplermittalaitteet ovat luotettavia ja paljon käytettyjä virtauksien mittaamisessa, joten niiden virtaushavaintojen vertaaminen aaltopoijujen virtaushavaintoihin tarjoaa tilaisuuden arvioida miten havainnot vertautuvat toisiinsa.



Kuva 1.3: Karttakuva Suomenlahdesta, johon on merkitty oranssilla merkillä mittalaitteiden asennusalue Hankoniemen lähellä (kartta: Maanmittauslaitos, 2020).

Tutkielmassa käytetyt havaintoaineistot ovat vuosilta 2017 ja 2018 Suomenlahdelta Hankoniemen itäpuolelta Tvärminnen edustalta Hästa Busön eteläpuolelta (Kuva 1.3). Tässä tutkielmassa on kuvattu mittauksissa käytetyt mittalaitteet, niiden tekniset ominaisuudet ja toimintaperiaatteet. Tutkielmassa käydään lyhyesti läpi aallokon- ja virtausmittauksien fysiikkaa ja miten niiden mittaaminen tapahtuu mittalaitteilla, joiden tuottamia havaintoja tässä tutkielmassa käytetään. Tutkielmassa käydään läpi myös miten vertailumittaukset on toteutettu ja miten käytetyt

mittalaitteet on asennettu mereen. Tutkielmassa käydään lyhyesti läpi myös miten saatua havaintoaineistoa on laatuarkastettu.

1.1 Aallokon ja virtausten fysiikkaa

Aallokkoa esiintyy kaikilla vesialtailla, kuten merissä ja järvissä. Aallokko koostuu pitkäaaltoisesta aina lyhytaaltoiseen, melkein värähtelyyn, veden pinnalla. Aallokon energia jakautuu eri taajuuksille aina 0,5 sekunnista 12 tuntiin. Tuulen synnyttämät aallot löytyvät 0,5 - 30 sekunnin alueelta. Tuulen aiheuttama aallokko ei ole aina samanlaista, vaan se vaihtelee ajallisesti ja alueellisesti. Aallokko alkaa pieninä ja lyhyinä aaltoina paikallisten tuulien seurauksena. Nämä aallot kasvavat tuulen voimakkuuden, tuulen keston ja tuulen pyyhkäisymatkan vaikutuksesta. Aaltokenttä voi koostua tuulen vaikutuksesta syntyneistä aalloista ja mainingista. Aallokko on siis joko lyhytaaltoisia paikallisesti syntyneitä tai pitkäaaltosia kilometrien päässä syntyneitä tai näiden yhdistelmiä. Veden pinta-aallot ovat kokonaisuus, joka koostuu näistä eri korkuisista, pituisista ja eri suuntiin kulkevista aalloista.

Suomenlahdella pintavirtaukset ovat pääasiallisesti tuulen aiheuttamia ja maapallon pyörimisliikkeen takia pintavirtaus kääntyy, noin 20 astetta oikealle, tuulen suunnasta avomerellä. Rantaviivan läheisyydessä pintavirtaus on merkittävästi vaikuttanut rannan läheisyydestä. Suomenlahdella meteorologisten ilmiöiden (tuuli, ilmanpaine) aiheuttamat vedenkorkeuden muutokset vaikuttavat myös pintavirtauksiin merkittävästi, aiheuttamalla vedenpinnan kallistumista Suomenlahdella. Mikä taas aiheuttaa vedenkorkeuden nousemisen Suomenlahden itäosissa ja tilanteen palautuessa normaalitilaan, virtauksen suunta voi poiketa tuulen suunnasta merkittävästi. Suomenlahden keskimääräinen pintavirtauksen voimakkuus on 5 - 10 cm/s, mutta merkittävät hetkelliset poikkeamat tästä ovat mahdollisia (Alenius et al., 1998).

2. Materiaalit ja menetelmät

Tässä luvussa käydään ensiksi läpi havaintoaineston mittaamiseen käytetyt havaintolaitteet, niiden toimintaperiaatteet ja miten mittaukset on toteutettu käytännössä. Lopuksi käydään lyhyesti läpi laaduntarkastusta, joka havaintoaineistolle on tehty mittausten jälkeen.

2.1 Havaintolaitteet

Tässä tutkielmassa käytetty havaintoaineisto on mitattu akustisella doppler profiloivavirtausmittalaitteella, lyhyemmin ADCP, ja aaltopoijuilla. Tällä hetkellä aaltopoijut ovat yleisin aallokon mittaukseen käytetty mittalaite ja akustisia doppler profiilivirtausmittalaitteiden aallokkomittauksia ovat verranneet niihin muun muassa Strong et al., 2000 ja Haavisto, 2015.

Tässä tutkielmassa käytetyt Datawellin pintapoijut ovat Ilmatieteen laitoksella eniten käytetty aallokonmittausmetodi, joten se on hyvä vertailukohta ADCP:n aallokkohavainnoille. Akustiset doppler-profiilivirtausmittalaitteet taas ovat vakiintuneet käytettäväksi virtausmittauksiin, jolloin ne soveltuvat Datawellin aaltopoijun virtaushavaintojen referenssihavainnoiksi.

2.1.1 ADCP

Mittauksissa mukana olleet akustiset virtausmittarit ADCP:t ovat Teledyne RD Instrumentin Sentinel V 50 malli ja Nortek SA:n Signature 500 malli. Mittalait-



Kuva 2.1: Teledyne RD Instrumentin Sentinel V 50 ADCP (Heini Jalli/Ilmatieteen laitos).

Taulukko 2.1: Sentinel V 50 mittalaitteen tekniset tiedot (Teledyne, 2015).

valmistaja	Teledyne RD Instruments
malli	Sentinel V 50
mittaustaajuus	500 kHz
mittaustarkkuus	0,3 %, +/-0,3 $\frac{cm}{s}$
resoluutio	0,1 $\frac{cm}{s}$
keilojen kulma	neljä 25 °kulmassa ja viides kohtisuorassa
syvyys solujen koko (2017)	0,5 m
syvyys solujen koko (2018)	1,0 m
pulssien määrä (2017)	2400
pulssien määrä (2018)	1200

teiden tarkemmat tekniset tiedot löytyvät taulukoista 2.1 (Sentinel V 50) ja 2.2 (Signature 500). Molemmat ADCP:t ovat lieriön muotoisia itsenäisiä mittalaitteita

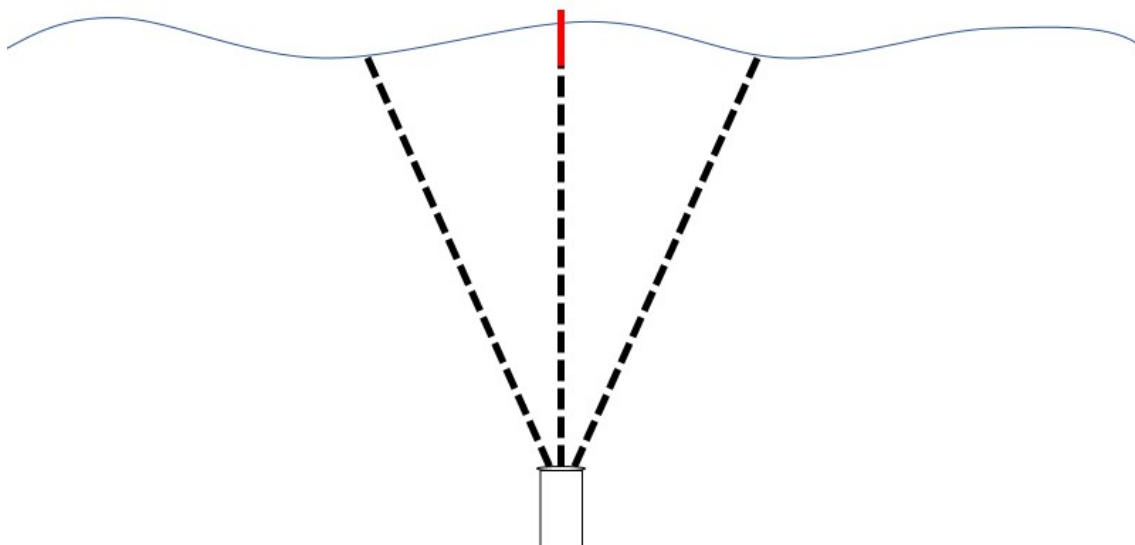
Taulukko 2.2: Signature 500 mittalaitteen tekniset tiedot (Nortek, 2020)

valmistaja	Nortek AS
malli	Signature 500
mittaustaajuus	500 kHz
mittaustarkkuus	0,3 %, $\pm 0,3 \frac{cm}{s}$
resoluutio	$0,1 \frac{cm}{s}$
keilojen kulma	neljä 25 °kulmassa ja viides kohtisuorassa

eli paineenkestävän ulkokuoren sisällä on mittauselektroniikka, muistikortti ja paristot (Kuva 2.1). Laitteisiin voidaan myös liittää kaapelilla ulkoisia lisäparistoja tai yhteyskaapeli tiedon- ja virransiirtoa varten. Lisäparistot tai virransaanti kaapeliyhteyden kautta mahdollistavat, että mittausaikaa ja mittaustaajuutta voidaan halutessa kasvattaa. Käytetyissä mittalaitteissa on viisi keilaa. Näistä neljä on vinoa keilaa, jotka ovat 25 asteen kulmassa ja yksi keila katsoo suoraan ylöspäin.

Akustisen doppler profiilivirtausmittalaitteen mittaustekniikka perustuu siihen, että se lähettää korkeataajuuksisia ääniaaltoja vesipatsaaseen, joko halutun mittausalueen alapuolelta tai yläpuolelta (Kuva 2.2). Mittalaite mittaa yksittäisten keilojensa nopeutta ja laskee palaavan pulssin Doppler siirtymän. Etäisyys mittauskohtaan määritetään lähetetyn ääniaallon kahdensuuntaisesta matka-ajasta. Äänen nopeuden avulla Doppler siirtymä muutetaan nopeudeksi ja laitemalli kohtaisen muunnosmatriisin avulla saadaan karteellinen kolmiulotteinen nopeus xyz-koordinaatistossa. Mittalaitteiden sisäisen kompassin ja asentosenorin havaintojen avulla xyz-koordinaatit saadaan muutettua Maan referenssikoordinaatistoon (Nortek, 2018a).

Doppler-ilmio on taajuudenmuutos aallossa, kun aallonlähde liikkuu suhteessa havainnoitsijaan tai kun havainnoitsija liikkuu suhteessa aallonlähteeseen. Sekä Nortekin Signature 500 että Teledyne RD Instrumentin Sentinel V 50 käyttävät Doppler ilmiötä hyväksi lähettämällä aaltopulssin ja kuuntelemalla palaavaa pulssia. Mitta-



Kuva 2.2: Yksinkertaistettu esitys ADCP:n aallokon mittausalueesta (Nortek, 2018a).

laitteet ovat laajakaistamittalaitteita, jotka lähettävät taajuusmoduloidun pulssin. Taajuusmoduloitu pulssi on siniaalto, joka muuttuu matalasta korkeaksi. Lähetettävä pulssi koostuu sarjasta taajuusmoduloituja pulsseja. Lähetetyn pulssin osien pituus määrittää mitatun nopeuden nopeusalueen.

Mittalaite vastaanottaa lähettämänsä pulssin heijastuneena vedessä kelluvista pienistä kappaleista, jos vesi on hyvin puhdasta eikä kappalaita ole niin virtausta ei voi mitata. Oletus on, että nämä vapaasti kelluvat kappaleet liikkuvat veden kanssa samalla nopeudella. Edellä mainittu oletus on keskeinen tekijä Doppler-ilmiötä hyödyntävässä mittalaitteistoissa. Toinen merkittävä tekijä on, että virtaukset ovat pääasiallisesti horisontaalisia ja horisontaalisesti homogeenisia. Toisin sanoen virtaukset voivat vaihdella nopeasti syvyyden mukaan, mutta niiden vaihtelut horisontaalisesti ovat hitaita.

Käytetyt mittalaitteet suhteuttavat taajuuden muutoksen lähetetyn pulssin heijastavien kappaleiden suhteelliseksi nopeudeksi, verrattuna mittalaitteeseen (Nortek, 2018a). Mittalaitteet eivät havaitse olleenkaan nopeuksia kohtisuorassa keiloi-

hinsa, koska vain muutokset, mittalaitteen ja hajauttavien kappaleiden välillä, vaikuttavat Doppler ilmiöön. Suhteellinen nopeus saadaan laskettua kaavalla:

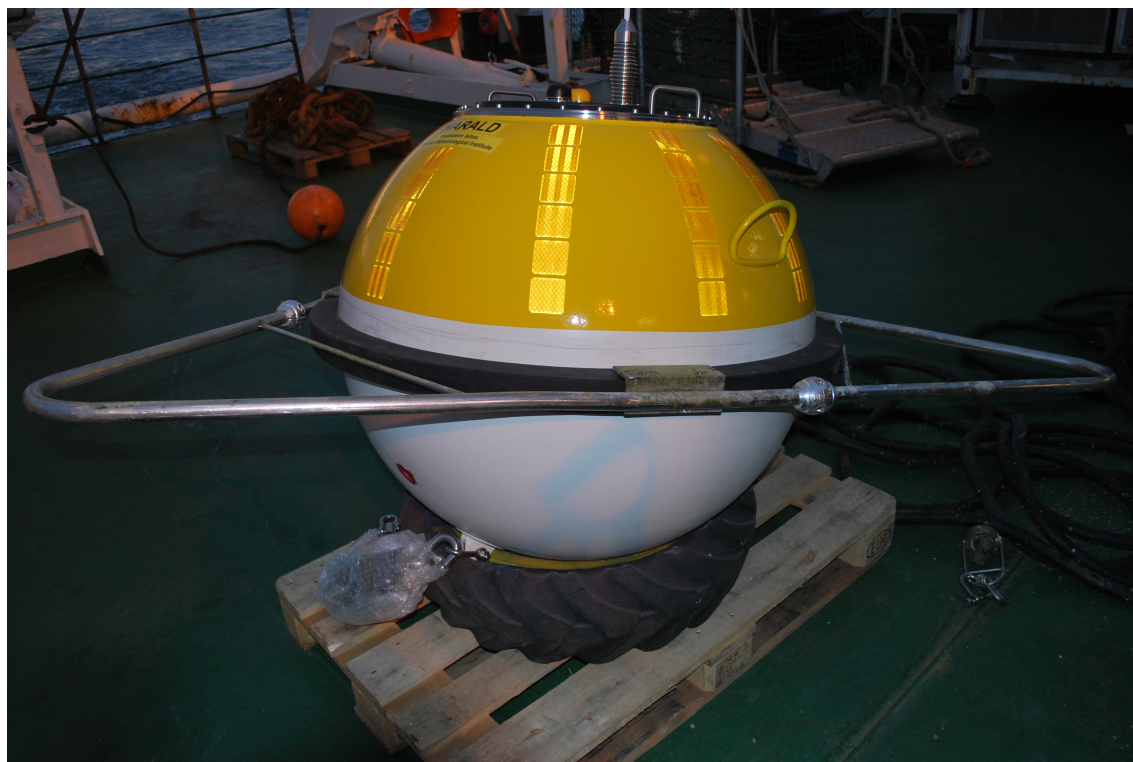
$$V = \frac{F_{Doppler}}{F_{Lähde}} * \frac{C}{2} \quad (2.1)$$

Kaavassa (2.1) V on virtausnopeus, $F_{Doppler}$ on muutos vastaanotetussa taajuuksessa, $F_{Lähde}$ on lähetetyn ääniaallontaajuuks ja C on äänennopeus vedessä (Nortek, 2018a).

Kaava 2.1 on yksinkertaistettu versio todellisesta tilanteesta. Lähetetty pulssi heijastuu useasta kappaleesta, joten palaava pulssi on näiden kaikkien kaiku ja se on paljon monimutkaisempi kuin kaava antaa olettaa. Kaikua käsitellään tilastotieteellisillä menetelmillä, kuten autokorrelaatio, jotta löydetäisiin toistuva kuvio kaiusta. Kahdella yhtenevällä kaiulla on korkea korrelaatio ja kahdella eriävällä on matala. Käytettäessä havaittua Doppler siirtymää nopeuden laskemiseen äänennopeus on merkittävä tekijä. Käytetyt mittalaitteet laskevat äänennopeuden käyttäjän sille antamasta suolaisuudesta ja mittalaitteen mittaamasta lämpötilasta. Äänennopeus on herkempi lämpötilan kuin suolaisuuden muutoksille.

2.1.2 Aaltopoiju

Aaltopoiju (Kuva 2.3) on pallomainen veden pinnalla kelluva poiju. Tässä tutkielmassa käytetty aaltopoijun havaintoaineisto on saatu käyttämällä Datawell BV:n Waverider DWR4 poijuja ja DWR-MkIII poijuja. Poijuista DWR4 malli on uudempi ja sen mittaustaajuuks on suurempi, myös sen havaintojen käsittelyä on parannettu (Datawell, 2012). Mittalaitteiden tarkemmat tekniset tiedot löytyvät taulukosta 2.3 (DWR-MkIII) ja taulukosta 2.4 (DWR4). Vuonna 2017 aaltopoijumittaukset tehtiin DWR4 mallin poijulla ja vuonna 2018 DWR-MkIII mallin poijulla. Molemmat poijumallit mittaavat aallokon lisäksi lämpötilaa ja DWR4 poijumalli mittaa vielä sen lisäksi pintavirtauksia. Virtausanturit ovat DWR4 poijun pallomaisen pinnan



Kuva 2.3: Datawell B.V. DWR4 aaltopoiju laivan kannella odottamassa asennusta mereen (kuva: Heini Jalli/Ilmatieteen laitos).

alaosassa, joka on vedenpinnan alla.

Taulukko 2.3: DWR-MkIII aaltopoijun tekniset tiedot (Datawell, 2014).

valmistaja	Datawell B.V.
malli	DWR-MkIII
mittaustaajuus	3,84 Hz
mittaustarkkuus	1,0 % mitatusta arvosta
resoluutio	1 cm

Tässä tutkielmassa käytettyjen ja vastaavanlaisten aaltopoijujen käyttäminen aallokon mittaamiseen on hyvin yleistä ja niiden mittauksia pidetään luotettavina. Poiju on laitevalmistajan suosituksen mukaan ankkuroitava pohjaan löysän köyden ja kumiköyden yhdistelmällä (Kuva 2.5). Tällainen ankkurointi mahdollistaa aal-

Taulukko 2.4: DWR4 aaltopoijun tekniset tiedot (Datawell, 2018).

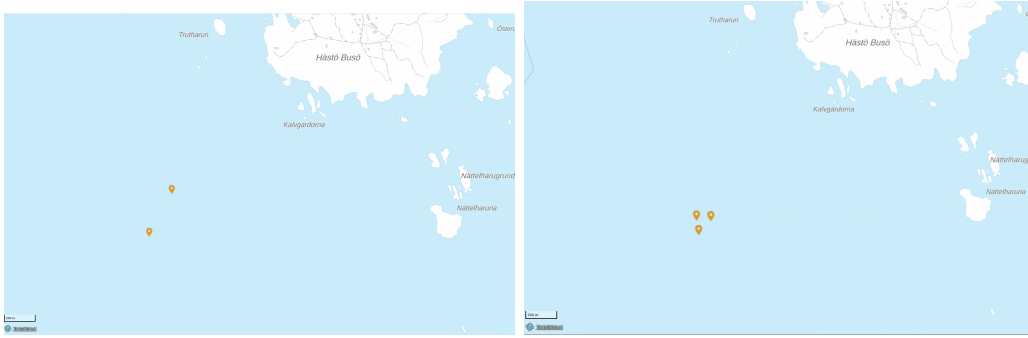
valmistaja	Datawell B.V.
malli	DWR4
mittaustaajuus (aallokko)	5,12 Hz
mittaustarkkuus (aallokko)	1,0 % mitatusta arvosta
resoluutio (aallokko)	vaihteleva, pienimmillään 1 mm
pulssin kesto (virtaus)	1ms
solun koko (virtaus)	0,4 m - 1,1 m veden pinnasta
mittaustaajuus (virtaus)	2 MHz
mittaustarkkuus (virtausnopeus)	1 % mitatusta arvosta +/- 2 cm/c
resoluutio (virtausnopeus)	1 mm/s
mittaustarkkuus (virtaussuunta)	0,1 °
resoluutio (virtaussuunta)	1,4 °- 3 °(riippuen leveyspiiristä)

topoijun vapaan liikkumisen aallokon mukana, mihin poijun aallokon mittaustekniikkakin perustuu. Yksinkertaistaen aaltopoiju mittaa aallokko-olosuhteita oman liikkeensä ja paikan suhteen vedenpinnalla. Poiju liikkuu aallokon mukana horisontaalisessa ja vertikaalisessa suunnassa. Poijun kiihtyvyyssanturin, asentosensorien ja kompassin avulla se havainnoi liikettään aallokossa, mikä muunnetaan sitten aallokon ominaisuuksiksi.

2.2 Mittaustavat

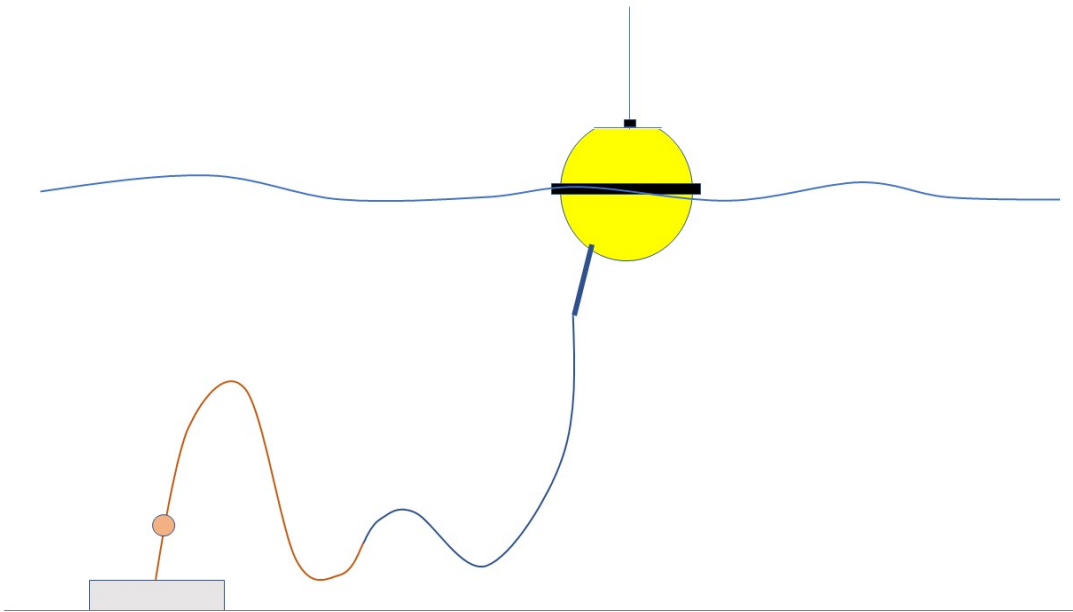
Tässä kappaleessa käsitellään sitä, miten tutkielmassa käytetty havaintoaineisto on saatu eli miten mittausjärjestelyt on tehty. Kappaleessa käydään myös tarkemmin läpi miten mittalaitteet mittaavat aallokkoa ja virtauksia.

Mittaukset on toteutettu kahtena (2017, 2018) kesä kautena Suomenlahdella



Kuva 2.4: Karttakuvat mittalaitteiden asunnuksista vuonna 2017 (vasen) ja vuonna 2018 (oikea) (Kartta: Maanmittauslaitos, 2020).

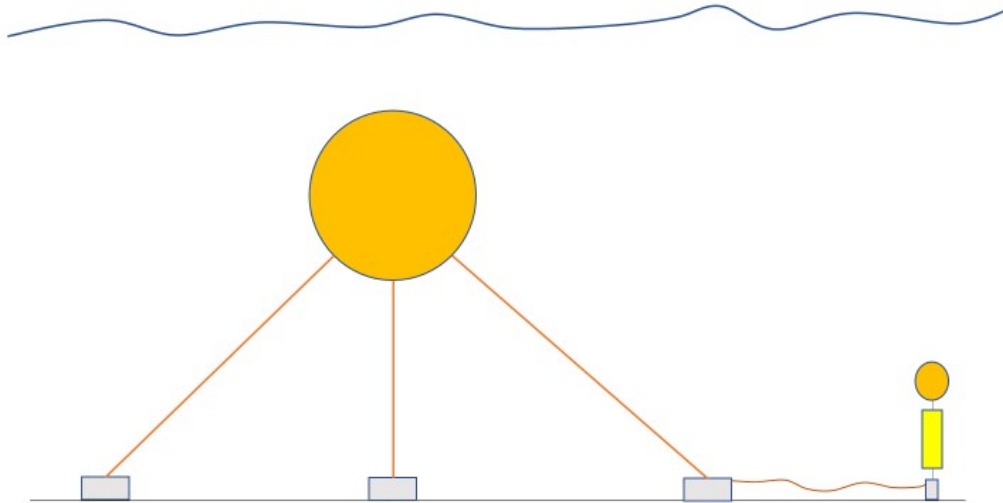
Tvärminnen eläintieteellisen aseman lähellä, Hästå Busön eteläpuolella. Mittalaitteiden asennuspaikat on merkitty kuvaan 2.4, mittalaitteet on asennettu molempina vuosina suurinpiirtein samalle alueelle. Mittausalueen koko on noin 200 metriä kertaa 400 metriä ja mittalaitteet on sijoitettu tämän alueen sisälle. Mittalaitteet on asennettu mahdollisimman lähelle toisiaan, ilman että ne häiritsevät toistensa mittauksia. Valitun mittausalueen pohjan syvyys on noin 36 metriä.



Kuva 2.5: Havainnekuva aaltopoijujen asennustavasta vuosina 2017 ja 2018.

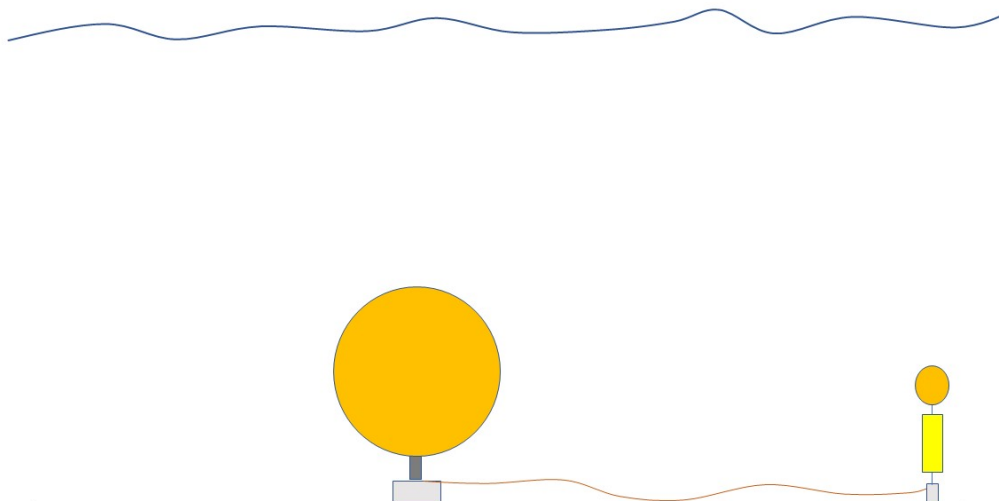
Maaliskuun lopulla vuonna 2017 asennettiin Datawellin DWR4 aaltopoiju ja

Teledyne RD Instrumentin Sentinel V 50 ADCP. Aaltopoiju asennettiin Datawellin suosittelemalla ankkurointitavalla, joka koostuu kumiköydestä, köydestä ja ankkurista. Aaltopoijun ankkurointia on havainnollistettu kuvassa 2.5. ADCP asennettiin kellukkeeseen, joka ankkuroitiin noin viiden metrin syvyyteen pinnasta jäykästi kolmella ankkurilla (Kuva 2.6).



Kuva 2.6: Havainnekuva Sentinel V 50 ADCP:n asennustavasta vuonna 2017. Asennus toteutettiin ilman pintapoijuja akustisen vapauttimen avulla.

Kesällä 2018 asennettiin samalle alueelle, kuin vuonna 2017 Datawellin DWR-MrIII poiju, Teledyne RD Instrumentin Sentinel V50 ja Nortek SAn Signature 500 ADCP:t. Aaltopoiju asennettiin samanlaisella löysällä ankkuroinnilla, kuten kesällä 2017 asennettiin DWR4 poiju. Molemmat ADCP:t asennettiin asennusalustoissaan pohjan lähelle, noin 34 - 35 metrin syvyyteen pinnasta. Asennustapa on havainnollistettu kuvassa 2.7 ja mittalaitteet asennusalustoissaan ovat kuvassa 2.8, vasemmalla Sentinel V 50 ja oikealla Signature 500. Vuoden 2018 Signature 500 mittausjärjestely oli muuten vastaava paitsi, että mittalaitteen alla olevaa metallista lisäpainoa ei ollut asennettu vuonna 2018.



Kuva 2.7: Havainnekuva Sentinel V 50 ADCP:n asennustavasta vuonna 2018. Asennus toteutettiin ilman pintapöijua akustisen vapauttimen avulla.



Kuva 2.8: Vasemmalla Teledynen Sentinel V 50 mittalaite asennettuna kellukkeeseen (kuva: Heini Jalli/Ilmatieteen laitos) ja oikealla Nortek AS Signature 500 mittalaite asennettuna kolmijalkaan vuonna 2019 (kuva: Milla Johansson/Ilmatieteen laitos).

2.2.1 Aallokko

ADCP

Kun ADCP:llä mitataan aallokkoa oletus, että nopeudet ovat horisontaalisesti homogeenisiä ei enää ole paikkansa pitävä. Aallokkoa mitatessa oletetaan että aalto-kenttä on tilastollisesti stabiili. Mittalaitteet keräävät niin kutsuttuja raakahavain-

toja aallokosta mittaamalla nopeuksia, virtauksia ja painetta. Nämä raakahavainnot pitää jälkikäteen prosessoida, että niistä saadaan halutut aallokko olosuhteet selville. Jälkikäteen tehtävä prosessointi on monimutkaista ja sitä ei tehdä mittalaitteissa itsessään, vaan mittauksen jälkeen erillisellä ohjelmistolla (Teledyne, 2020) (Nortek, 2018a). Teledyne RD Instruments käyttää jälkikäsitteilyyn Velocity-ohjelmistoa ja tarkempi kuvaus ohjelmistosta löytyy ohjelman manuaalista Teledyne, 2013.

Akustisten doppler profiloivien virtausmittareiden voidaan katsoa tekevän kaksi erillistä mittausta, jotka omalta osaltaan mahdollistavat arvion tekemisen suunnatuista ja ei-suunnatuista aaltoparametreista (Kuva 2.2). Ensimmäinen mittaus on, kun neljä 25 asteen kulmassa olevaa keilaa mittaavat aaltojen synnyttämiä kiertorata nopeuksia. Kaikki neljä keilaa mittaavat profiilin, joka mahdollistaa yksinään kiertoratanopeuksien mittaamisen. Toisen mittauksen tekee viides suoraan ylöspäin katsova keila, joka toimii altimetrina ja mittaa suoraan etäisyyden pinnalle. Viides keila siis seuraa vedenpinnan aaltoprofilia sen ylittäessä keilan näköalueen. Paineanturin havaintoja käytetään hyväksi altimetrimittauksien parantamiseksi. Mittalaitteiden viides keila takaa hyvin selvitetyn mittalaitteeseen suhteutetun pystysuoran liikkeen. Tämä parantaa aaltohavaintoja ja mahdollistaa korkean erottelukyvyyn etäisyysmittauksissa.

Kiertoratanopeuksien mittaamisen perusteella voidaan mittauksia tulkita aallokko-olosuhteiksi aaltoliikkeen teorian avulla. Kierrosrata nopeudet vaimenevat eksponentiaalisesti syvyyden lisääntyessä ja aallonpituuden lyhentyessä. Aallokon aiheuttama energia ulottuu vain tietylle syvyydelle ja sitä alemmista kerroksista energiaa ei voi mitata. Korkeamman taajuuden aallot vaimenevat nopeammin syvyyden kasvaessa. Edellä mainittujen tekijöiden takia aallokon mittaamiselle ADCP:llä on mittalaitteen asennussyvyydestä ja taajuudesta aiheutuvia rajoitteita (Nortek, 2018b).

Aaltopoiju

Molemmat aaltopoijumallit mittaavat aallokkoa kiihtyvyyssanturin, asentosensorien ja kompassin avulla. Poijun ankkurointitapa on myös yksi edelletys mittauksien onnistumiselle. Kiihtyvyyssanturin herkkyysakseli on pystysuunnassa. Aallokon liike saadaan, kun kiihtyvyyssanturin mittaukset suodatetaan ja integroidaan kaksi kertaa. Laitevalmistajan (Datawell, 2018) mukaan heidän teknisen ratkaisunsa vahvuus on painovoimalla vakautettu alusta, johon kiihtyvyyssanturi on asennettu. Alusta koostuu levystä, joka on saman tiheyksisen nesteen ympäröimä. Levyyn kiinnitetyn hyvin pienen metallisen painon avulla levystä saadaan painovoima herkkä. Nesteen suuri massa, suhteessa metallisen painon aiheuttamaan pieneen voimaan, johtaa siihen, että saadaan alusta, joka on merellä tapahtuvista liikkeistä huolimatta melkein aina horisontaalinen. Kiihtyvyyssanturin asentaminen tähän vakautettuun levyyn tekee aallonkorkeuden mittaamisesta suoraviivaista. Aallonkorkeus on kiihtyvyyssanturin vertikaalinen kiihtyvyysskomponentti.

Aallokon suunta määritetään mittaamalla poijun horisontaalinen liike ja korreloimalla tämä liike poijun vertikaaliseen liikkeeseen. Kaksi toisiinsa kohtisuorassa olevaa kiihtyvyyssanturia on kiinnitetty poijuun niin, että ne mittaavat poijun horisontaalisen liikkeen, poijun ollessa pystysuorassa asennossa. Jos poiju on vinossa aallokon seurauksesta, niin se saadaan selville poijun asentosensorien avulla ja niiden avulla pystytään myös kompensoimaan mittaukset takaisin pystysuoraan asentoon. Näin asentosensorien avulla kiihtyvyyssantureiden mittaukset saadaan muutettua todelliseksi vaakasuoraksi kiihtyvyydeksi. Poijun magneettisen kompassin avulla poijun kiihtyvyysskoordinaatit lasketaan uudelleen maantieteelliseen koordinaatistoon, josta saadaan aallokon suunta (Datawell, 2018).

2.2.2 Virtaukset

ADCP

ADCP mittaa virtauksia aikaisemmin tässä tutkielmassa läpikäydyn Doppler siirtymän avulla (kappale 2.2.1). Kolmiulotteisten virtauskomponenttien mittaamiseen tarvitaan vähintään kolme keilaa. Käytetyt ADCP:t mittaavat virtaukset käyttämällä neljää vinossa olevaa keilaa. Ensimmäinen kahdesta keilasta koostuva pari mittaa yhden vertikaalisen ja horisontaalisen nopeuskomponentin. Toinen keilapari mittaa toisen kohtisuoran horisontaalisen ja vertikaalisen nopeuskomponentin. Näin meillä on arviot kahdelle horisontaaliselle nopeuskomponentille ja kaksi arviota vertikaalisesta nopeudesta. Kolmiulotteinen nopeus on yhteenlaskettu tulos kahden parin horisontaalisista nopeuksista ja ensimmäisen tai toisen parin vertikaalisesta nopeudesta. Kahta vertikaalista nopeutta hyödynnetään mittalaitteiden valmistajien automaattisissa laaduntarkastusprosesseissa. Sitä käytetään arvioimaan onko oletus horisontaalisesta homogeenisuudesta paikkansa pitävä.

ADCP mittaa virtausprofiilin ja jakaa nopeusprofiilin yhdenmukaisiksi osioiksi, joita kutsutaan syvyysoluiksi. Jokainen yksittäinen syvyysolu on verrattavissa yhteen virtamittariin, joten ADCP:n virtausprofiili on kuin nauha virtamittareita olisi yhdenmukaisella välityksellä ankkuroituna. ADCP:llä on kuitenkin kaksi selkeää eroa yksittäisiin virtamittareihin. Ensinnäkin ADCP:n profiili on aina yhdenmukaisesti eroteltu, kun taas virtausmittarit voidaan asentaa epäsäännöllisellä välityksellä. Toiseksi ADCP mittaa keskinopeuden koko syvyysolun yli, kun virtamittari mittaa pistemittauksen yhdessä paikassa. ADCP:n syvyysolujen säännöllisyys tekee havaintojen prosessoinnista ja tulkinnasta helpompaa.

ADCP:n mittausetäisyys ja resoluutio johtuvat pääsääntöisesti mittalaitteen taajuudesta. Mitä korkeampi taajuus on, niin sitä lyhyempi mittausetäisyys, mutta korkeampi resoluutio. Mitä pienempiin syvyysoluihin koko mittausalue on jaettu ja siten mitä enemmän soluja on sitä tarkempia virtauksen yksityiskohtia voidaan tark-

kailla. Vuonna 2017 syvyyslajien koko oli 0,5 metriä ja vuonna 2018 syvyyslajien koko oli yksi metri. Syvyyslajin koon vaihtuminen on seurausta asennussyvyyden kasvamisesta ja mittalaitteen paristojen kulutuksesta.

Aaltopoiju

Datawellin DWR4 aaltopoijussa on kolme akustista virtausmittaria, joiden toimintaperiaate perustuu Doppler siirtymään. Doppler siirtymä on selitetty tarkemmin aikaisemmin tässä tutkielmassa kappaleessa 2.2.1. DWR4 aaltopoijun runkoon on asennettu kolme akustista lähetintä, joiden avulla pystytään havainnoimaan pintavirtausta. Runkoon sijoitetut akustiset lähettimet ovat sijoitettu 120 asteen välein ja ne katsovat 30 astetta alaviistoon. Jokainen akustinen lähetin tekee itsenäiset mittaukset. Mittaus tapahtuu noin metrin syvyydessä pinnasta. DWR4 aaltopoiju mittaa kymmenen minuutin välein pintavirtauksen suuruuden ja suunnan. Yhden minuutin aikana jokainen akustinen lähetin lähettää 150 akustista pulssia. Akustisten lähettimien mittaukset muunnetaan DWR4 aaltopoijun kallistussensorien ja kompassin avulla vertikaalisiksi nopeuksiksi. DWR4 aaltopoijun virtausmittauksille tehdään laaduntarkistus ja keskiarvoistus poiijussa. Itse DWR4 aaltopoijun vaikutukset virtausmittauksiin on, potentiaali teoriaan perustuen, muutamien prosenttien aliarviointi (Datawell, 2018).

Koska DWR4 aaltopoiju on pintapoiju, niin aallokko vaikuttaa DWR4:n pintavirtausmittauksiin. Aallokon orbitaalisen luonteen vuoksi horisontaalinen nopeus ei ole vakio ajan ja paikan suhteen, joten erilaisilla aallon periodeilla on eri vaikutus virtausmittauksiin. Lyhyet aallonjaksot, yhteen sekuntiin asti, keskiarvoistuvat pois virtausmittauksien mittausjaksosta. DWR4 aaltopoijun koon takia kyseinen aallonpituus on liian lyhyt, että aaltopoiju seuraisi aallokkoa ja virtausmittaukset olisivat keinotekoisia. Aallot, joiden periodi on pienempi kuin 30 sekuntia, voivat vaikuttaa yksittäisten akustisten pulssien mittaamiin virtauksiin. DWR4 aaltopoiju on

asennettu löysällä ankkuroinnilla, mikä vähentää tätä vaikutusta (Datawell, 2018).

DWR4 aaltopoijun virtausmittauksiin vaikuttaa pitemmällä aikavälillä myös poijun rungossa olevien akustisten lähettimien peittyminen muun muassa merirokkoon (biofouling). Tässä tutkielmassa käytetty havaintoaineisto on niin lyhyeltä ajanjaksolta, että sillä ei ole ollut merkitystä mittauksiin. Normaalissa ympärivuotisessa käytössä DWR4 aaltopoijun akustisia lähttimiä pitää puhdistaa säännöllisesti, jotta vaikutus virtausmittauksiin jäisi mahdollisimman pieneksi.

DWR4 aaltopoiju käyttää suolaisuudella ja lämpötilalla korjattua veden äänennopeutta virtauksien laskemiseen havainnoista. Laskuissa käytetty lämpötila on DWR4 aaltopoijun lämpötila-anturin mittaama veden lämpötila ennen jokaista virtausmittausjaksoa. Käytetty suolaisuus on vakio ja se on 35 ppt ja tämä on noin 30 ppt suurempi kuin Suomenlahden pintasuolaisuus. Vakiosuolaisuuden käyttäminen äänennopeuden laskemisen kaavassa aiheuttaa noin 2,2 % virheen virtausmittauksiin (Datawell, 2018). Käytännössä tuolla 2,2 % virheellä ei ole merkitystä virtauksien mittaamiseen, mutta jos koetaan tarpeelliseksi poistaa tuo 2,2 % virhe, niin se pystytään tekemään jälkikäteenkin havaintoaineistolle.

2.3 Laaduntarkastus

DWR-MkIII aaltopoiju mittaa aallokkoa 27 minuutin ajanjakson (Datawell, 2014) ja DWR4 aaltopoiju mittaa 30 minuutin ajanjakson (Datawell, 2018), näistä mitatuista energiaspekreistä lasketaan merkitsevä aallonkorkeus H_s , huipun periodi T_p ja aallokon suunta. Poijut lähettävät ja mahdollisesti tallentavat muistikortille lasketut mittaukset puolen tunnin välein. DWR4 mallin aaltopoiju mittaa edellä mainittujen lisäksi pintavirtauksia kymmenen minuutin välein.

Sentinel V 50 ADCP mittasi vuosina 2017 ja 2018 aallokkoa ja virtauksia tunnin välein. Vuonna 2017 syvyyssolun koko oli 0,5 metriä ja vuonna 2018 yhden metrin, soluja oli 18 vuonna 2017 ja 39 vuonna 2018. Mittalaite oli vuonna 2017

asennettu noin viiden metrin syvyyteen ja vuonna 2018 noin 35 metrin syvyyteen, tämä on syy syvyysolujen määrän selvälle erolle vuosien välillä. Ensimmäiset syvyysolut olivat 1,68 metriä (2017) ja 2,22 metriä (2018) laitteen yläpuolella, mutta näillä ei ole suurta merkitystä tämän tutkielman kannalta, koska olemme kiinnostuneet aallokosta ja pintavirtauksesta. Toisin sanoen, olemme kiinnostuneita ADCP:n ylimpien (pintaa lähimpien) solujen havainnoista, sillä ne vastaavat parhaiten aaltopoijun mittausaluetta. ADCP (Sentinel V 50) lähetti yhden mittauksen aikana 2400 pulssia (2017) ja 1200 pulssia (2018), näiden pulssien väli oli 0,5 sekuntia molempina vuosina.

Koska ADCP:n havainnot ovat vain tunnin välein, niin havaintoja vertaillessa on käytetty aaltopoijujen havainnoista lähintä vastaavaa havaintoa. Vuonna 2017 mittalaitteet olivat yhtä aikaa mittaamassa ajanjakson 29.03.2017 11:37 UTC – 19.04.2017 08:00 UTC. Vertailtavia havaintoja on ennen laaduntarkastusta 497 vuonna 2017. Vuonna 2018 samanaikaisia havaintoja mittalaitteilta on ajanjaksoilta 24.05.2018 11:30 UTC - 12.07.2018 05:30 UTC ja 30.07.2018 06:30 - 01.10.2018 07:30 UTC. Vertailtavia havaintoja mittalaitteilta on 2654 ennen laaduntarkastusta vuonna 2018.

Tässä tutkielmassa käytetyn Sentinel V 50 ADCP:n virtaushavainnot on laaduntarkastettu tutkielmassa Kanarik, 2018 esitetyillä laaduntarkastus menetelmillä. ADCP:n aallokkohavainnoista on muun muassa poistettu mittausjakson alusta ja lopusta kyseenalaiset havainnot. Datawellin aaltopoijujen havainnoillekin on tehty mittauksien alkuajankohtaan ja loppuajankohtaan liittyvää havaintojen tarkistusta. Datawellin DWR4 poijun pintavirtaushavainnoille ei ole tehty erillistä laaduntarkastusta laitevalmistajan omien suodattamien lisäksi.

Mittalaitteiden aallokkohavainnoille on tehty myös laaduntarkastus tiettyjen suurekohtaisten raja-arvojen avulla, mitkä on määritetty ADCP:n laitevalmistajan ilmoittamien rajoitusten mukaan (Teledyne, 2016). Vuoden 2017 havainnoista on

poistettu havainnot, joissa huipun periodi ei ole välillä 1,6 s - 15 s ja aallokon suunta ei ole välillä 0 ° - 360 °. Vuoden 2018 havainnoille vastaavat rajat ovat seuraavat, huipun periodi 4,4 s - 15 s, suunta 0 ° - 360 ° ja merkitsevä aallonkorkeus on yli 0.05 metriä. Vuosittaiset erot laaduntarkastuksen rajoissa ovat seurausta ADCP:n asennussyvyydestä johtuvista resoluutio eroista (Teledyne, 2015). Aallokon suunnille on tehty eranto korjaus, 7,5°.

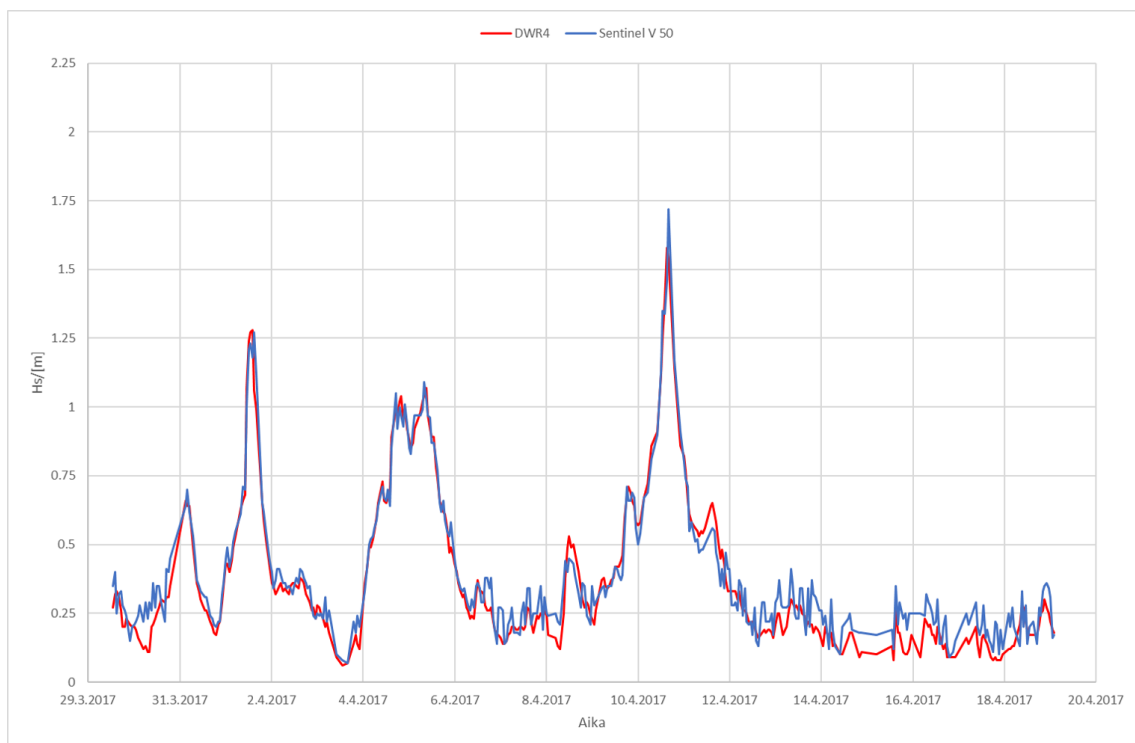
Laaduntarkastuksen seurauksena vuoden 2017 aallokkohavainnoista on jäljellä 80% kaikista havainnoista ja vuoden 2018 aallokkohavainnoista on jäljellä 44% kaikista havainnoista.

3. Tulokset ja keskustelu

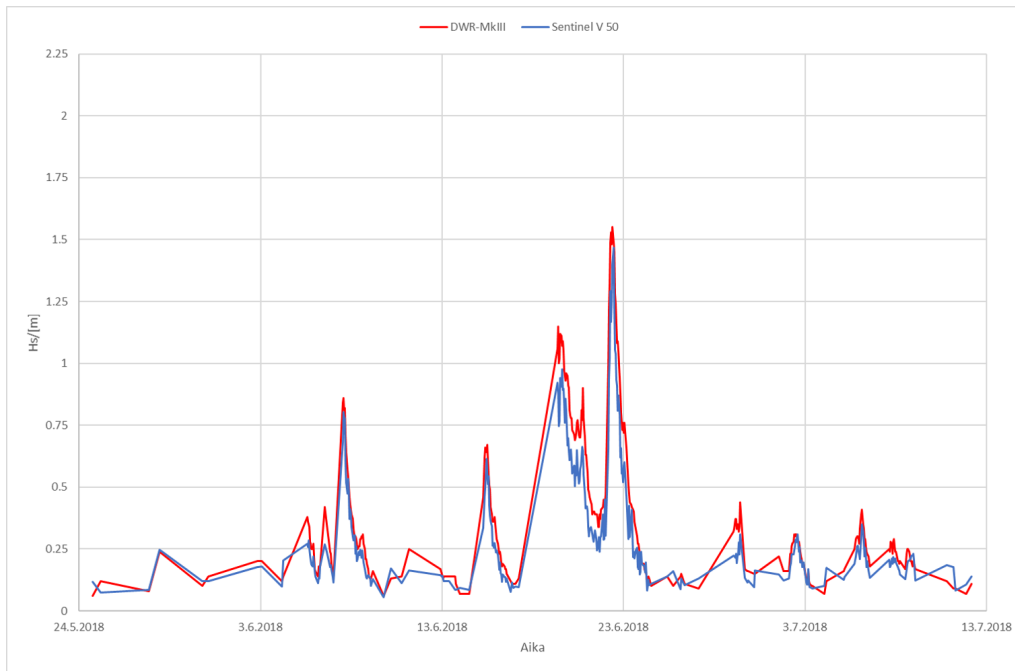
3.1 Aallokko

3.1.1 Merkitsevä aallonkorkeus

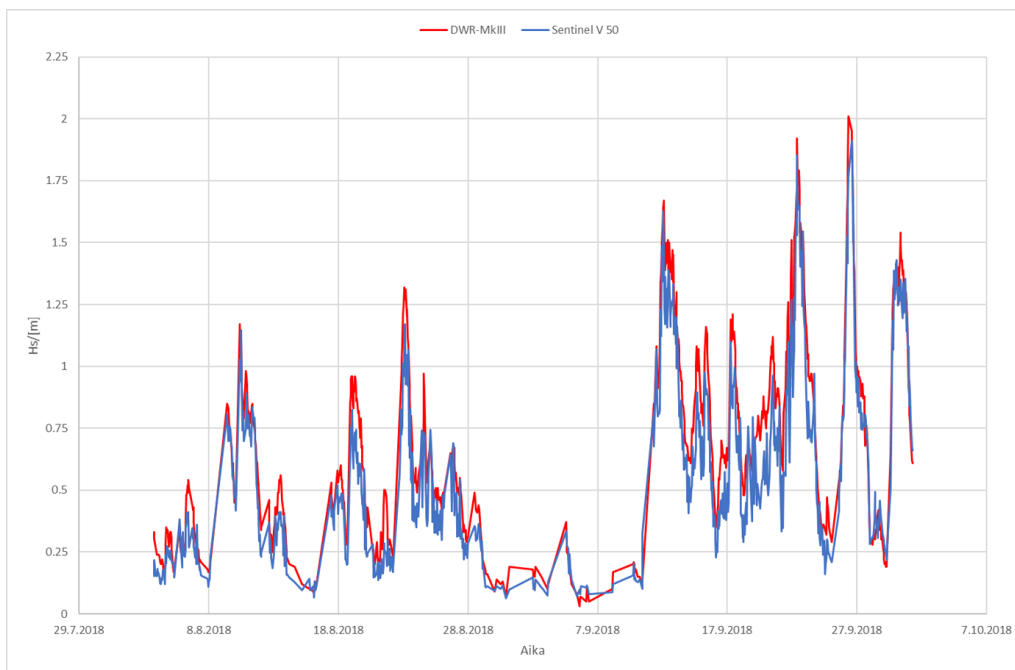
ADCP:n mittaamaa merkitsevän aallonkorkeuden tarkkuutta arvioitiin vertaamalla sitä aaltopöijun mittaamaan arvoon (Kuvat 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5).



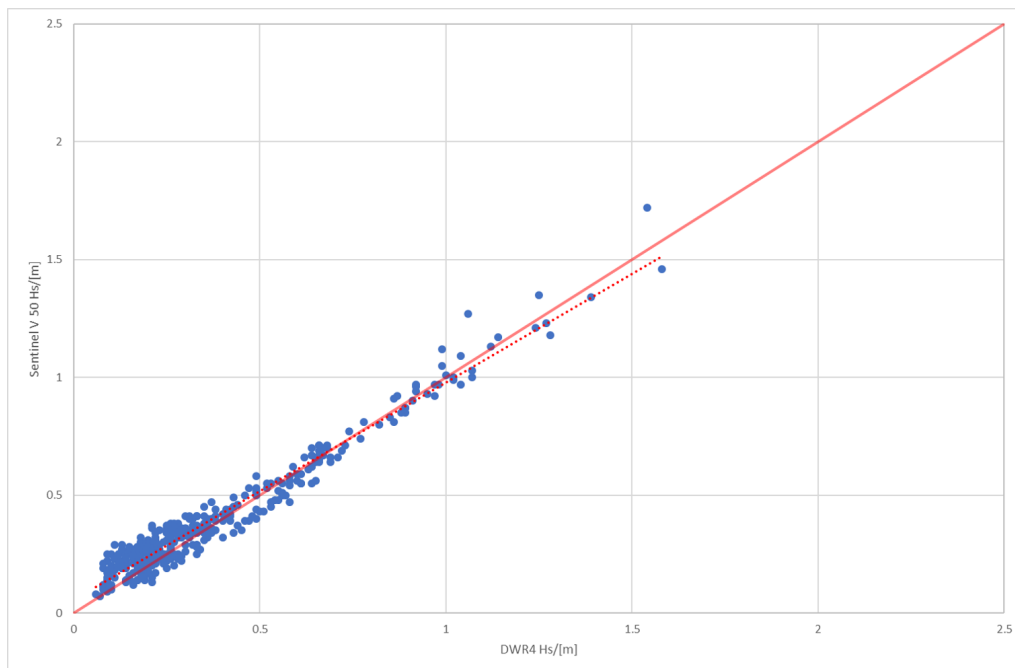
Kuva 3.1: Vuoden 2017 aaltopöijun (DWR4) ja ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevän aallonkorkeuden aikasarja koko mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.2: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevän aallonkorkeuden aikasarja 24.05. - 12.07.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.

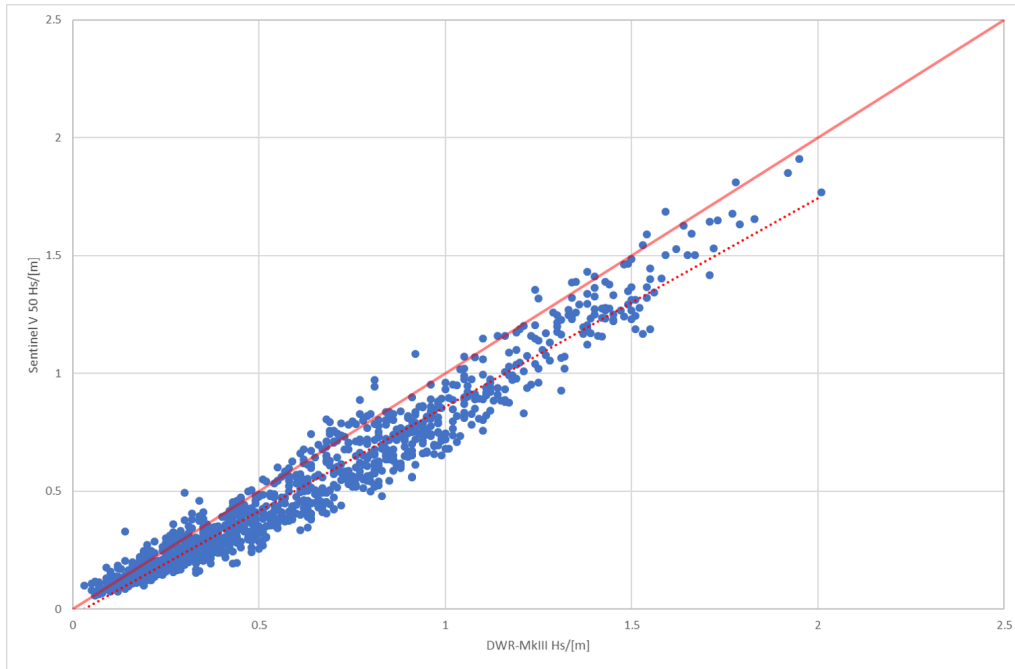


Kuva 3.3: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevän aallonkorkeuden aikasarja 30.07. - 01.10.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.4: Vuoden 2017 ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevän aallonkorkeuden havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR4) merkitsevän aallonkorkeuden havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen yhtenäinen suora on 1:1 viiva ja katkonainen on lineaarinen trendi.

Vuoden 2017 osalta ADCP:n mittaama merkitsevä aallonkorkeus vastaa melko hyvin aaltopoijun merkitsevää aallonkorkeutta (Kuvat 3.1, 3.4). Varsinkin korkeammilla aallonkorkeuden, yli 0,5 m, arvoilla vastaavuus mittalaitteiden välillä on hyvä. ADCP:n arvot poikkeavat eniten aaltopoijun havainnoista, kun poijun mitaama merkitsevä aallonkorkeus on 0,25 metrin läheisyydessä tai sen alle. Vuonna 2017 havaitun korkeimman merkitsevän aallonkorkeuden, 1,75 m, arvot eroavat mittalaitteiden välillä ADCP:n mittauksen ollessa noin 20 senttiä aaltopoijun havaintoa korkeampi. Kaikki mitatut arvot ovat hyvin lähellä kuvan 3.4 1:1 viivaa ja korrelaatio-suora eroaa vain vähän tuosta 1:1 viivasta. Vuoden 2017 ADCP:n merkitsevän aallonkorkeuden havainnot eivät ole johdonmukaisesti, joko suurempia tai pienempiä, kuin aaltopoijun merkitsevän aallonkorkeuden arvot. Mittalaitteiden havaintojen vastaavuuteen ei ole ollut merkittävää vaikutusta sillä, mikä merkitsevän aallonkorkeuden arvo on.



Kuva 3.5: Vuoden 2018 ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevän aallonkorkeuden havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR-MkIII) merkitsevän aallonkorkeuden havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen yhtenäinen suora on 1:1 viiva ja katkonainen on lineaarinen trendi.

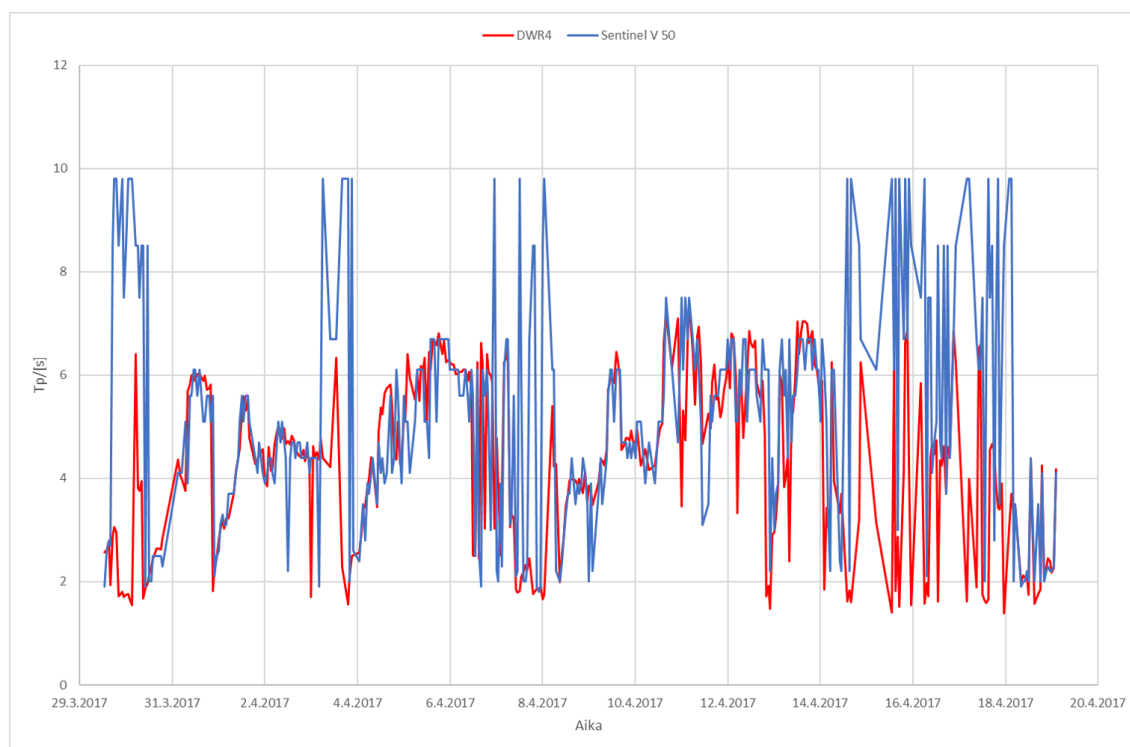
Vuonna 2018 ADCP:n ja aaltopoijun mittaamien merkitsevän aallonkorkeuden arvojen (Kuvat 3.2, 3.3, 3.5) välillä nähdään enemmän eroja, kuin vuoden 2017 havainnoissa, kaikilla merkitsevän aallonkorkeuden arvoilla. Tarkasteltaessa lyhyempää ajanjaksoa (Kuva 3.2), joka on pituudeltaan lähempänä vuoden 2017 havaintojaksoa, vuoden 2018 mittauksista ero nähdään vielä selkeämmin. Erot merkitsevässä aallonkorkeudessa ovat vuoden 2018 arvojen vertailussa pienimmät suuremmilla aallonkorkeuksilla, yli 0,5 m. ADCP aliarvioi merkitsevää aallonkorkeutta kaikilla merkitsevän aallonkorkeuden arvoilla (Kuva 3.5). Ero ADCP:n ja aaltopoijun merkitsevän aallonkorkeuden havaintojen välillä vuonna 2018 kasvaa suuremmaksi aallokon kasvaessa suuremmaksi.

Vuonna 2017 on merkittävästi vähemmän mittausarvoja yhden metrin ja kahden metrin merkitsevän aallonkorkeuden välillä kuin vuonna 2018 ja tuolla havaintojen määrän erolla on todennäköisesti ollut merkitystä, siihen että vuonna 2017 ei

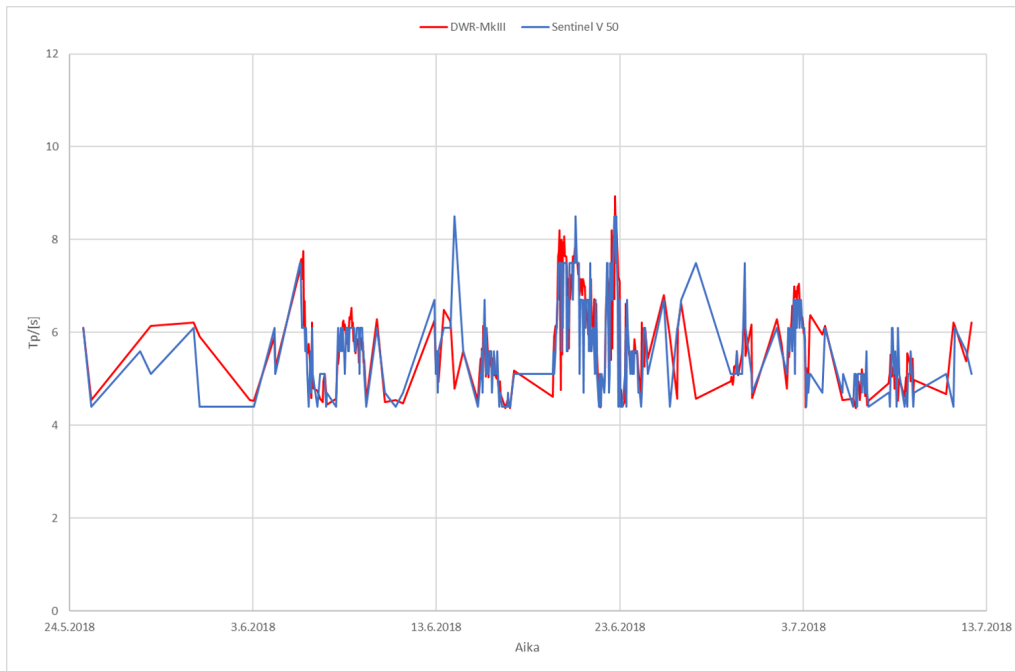
ole yhtä selvää ADCP:n arvojen aliarviointia yli yhden metrin aallokolla. Sillä myös vuoden 2017 havainnoissa nähdään paljon pienemmässä määrin ADCP:n aliarviointia suuremmilla merkitsevän aallonkorkeuden mittausrvoilla (Kuva 3.4). Tämän perusteella vuonna 2018 ei ole yhtä selkeää alarajaa ADCP:n mittauskyvyille kuin vuonna 2017 oli havaintojen vertailussa nähtävissä. Merkittävä muutos vuosien 2017 ja 2018 asennusten välillä oli ADCP:n asennussyvyys, vuonna 2017 noin 5 metriä ja vuonna 2018 34 metriä (tarkemmin kappaleessa 2.2), sillä on ollut selkeä merkitys ADCP:n merkitsevän aallonkorkeuden mittaustarkkuuteen ja erotuskykyyn.

3.1.2 Huipun periodi

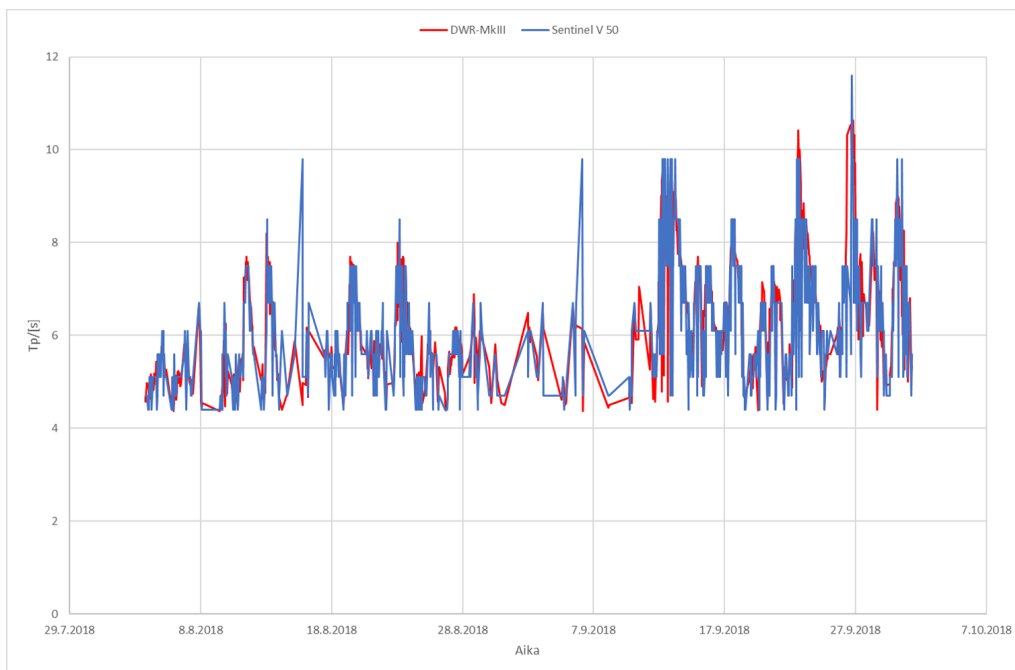
ADCP:n huipun periodin tarkkuutta on arvioitu vertaamalla sitä aaltopoijun huipun periodin mittauksiin (Kuvat 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10).



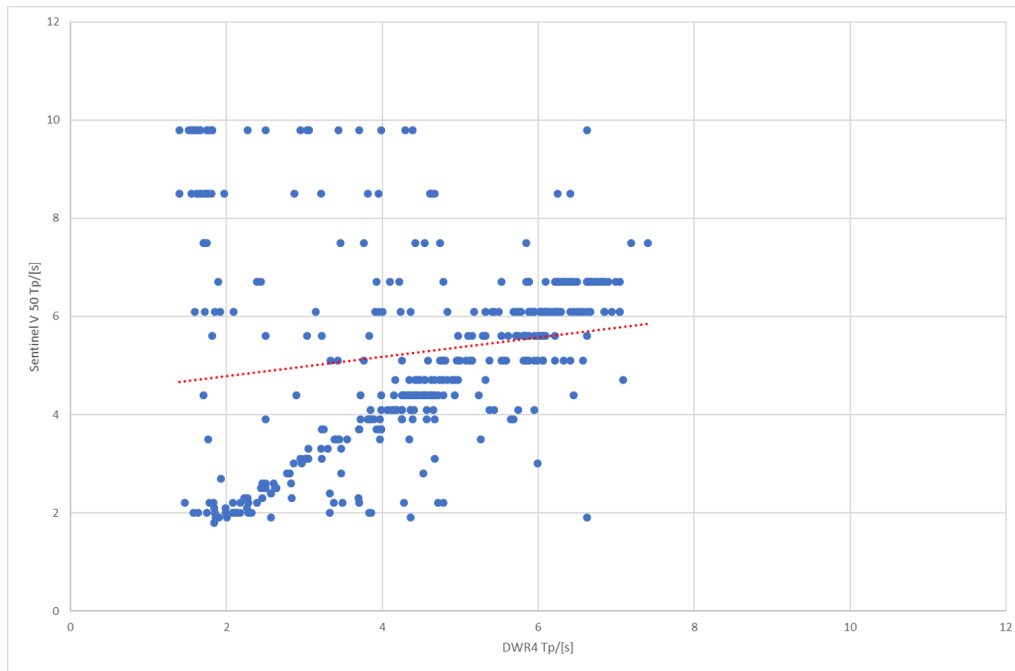
Kuva 3.6: Vuoden 2017 aaltopoijun (DWR4) ja ADCP:n (Sentinel V 50) huipun periodin aikasarja koko mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.7: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (Sentinel V 50) huipun periodin aikasarja 24.05. - 12.07.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



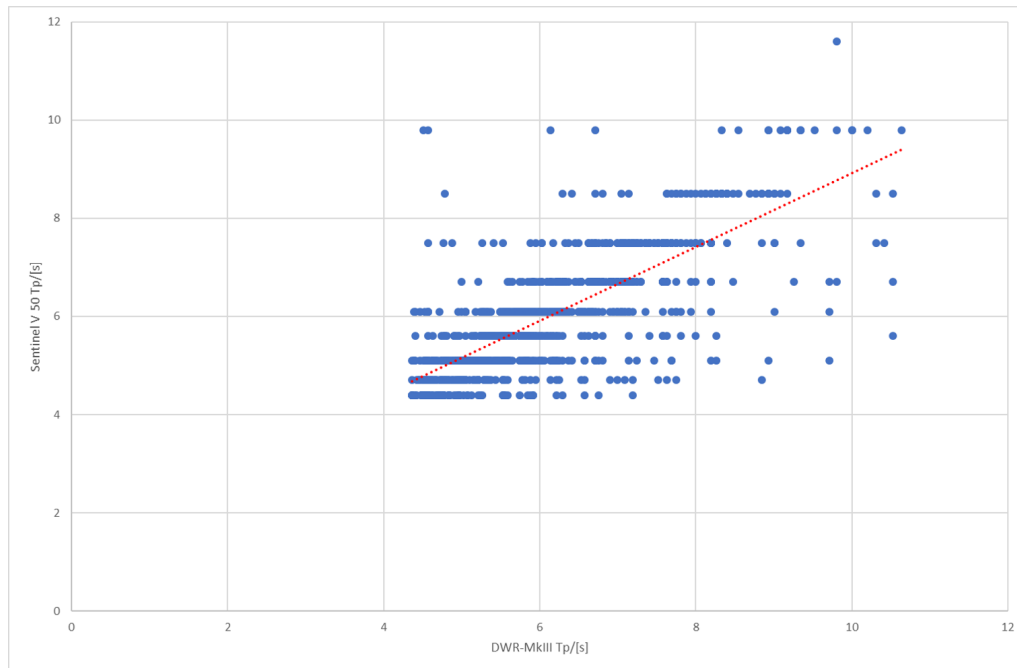
Kuva 3.8: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (Sentinel V 50) huipun periodin aikasarja 30.07. - 01.10.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.9: Vuoden 2017 ADCP:n (Sentinel V 50) huipun periodin havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR4) huipun periodin havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen katkonainen suora on lineaarinen trendi.

Huipun periodin vuoden 2017 vertailussa huomataan selkeästi (Kuva 3.6), että ajoittain ADCP:n huipun periodi vastaa hyvin aaltopoijun huipun periodia. Toisaan hyvin vastaavat huipun periodin ajanjaksot ovat karkeasti neljän merkitsevän aallonkorkeuden piikin ajalta ja sijoittuvat juuri ennen tai niiden jälkeen. Merkitsevä aallonkorkeus on ollut kyseisinä aikoina lähellä 0,75 metriä tai enemmän.

Ajanjaksoilla, jolloin mittalaitteiden mittaamat huipun periodit vastaavat toisiaan huonoiten, on havaittavissa, että ADCP:n arvot ovat pääsääntöisesti suurempia kuin aaltopoijun mittausravot. Aaltopoijun havainnot ovat olleet useasti 2 sekunnin luokkaa, kun ADCP:n arvot ovat olleet samaan aikaan 10 sekunnin luokkaa. Näin merkittävä ero periodissa viittaa siihen, että ADCP:llä on ongelmia periodin mittaamisessa, vaikka sen pitäisi pystyä havaitsemaan 1,6 sekunnin periodit ja sitä suuremmat arvot. Vuoden 2017 mittausravojen vertailussa (Kuva 3.9) voimme havaita jonkinlaista arvojen yhtenevääsyyttä kuvaajassa, kahden ja neljän sekunnin



Kuva 3.10: Vuoden 2018 ADCP:n (Sentinel V 50) huipun periodin havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR-MkIII) huipun periodin havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen katkonainen suora on lineaarinen trendi.

välillä, mutta sitä ei näy pisteisiin sovitetusta suorasta.

Vuoden 2018 huipun periodin (Kuvat 3.7, 3.8) vertailussa nähdään sama ilmiö kuin vuoden 2017 huipun periodin havainnoissa, että ajoittain mittalaitteiden mitaamat arvot vastaavat toisiaan hyvin ja toisinaan niissä ei taas ole mitään vastaavuutta. Vuonna 2018 nähdään, että kun aaltopoijun havainnot ovat lähellä ADCP:n mittausrajoja niin ADCP:n arvot ovat herkästi virheellisiä, 10 sekunnin luokkaa.

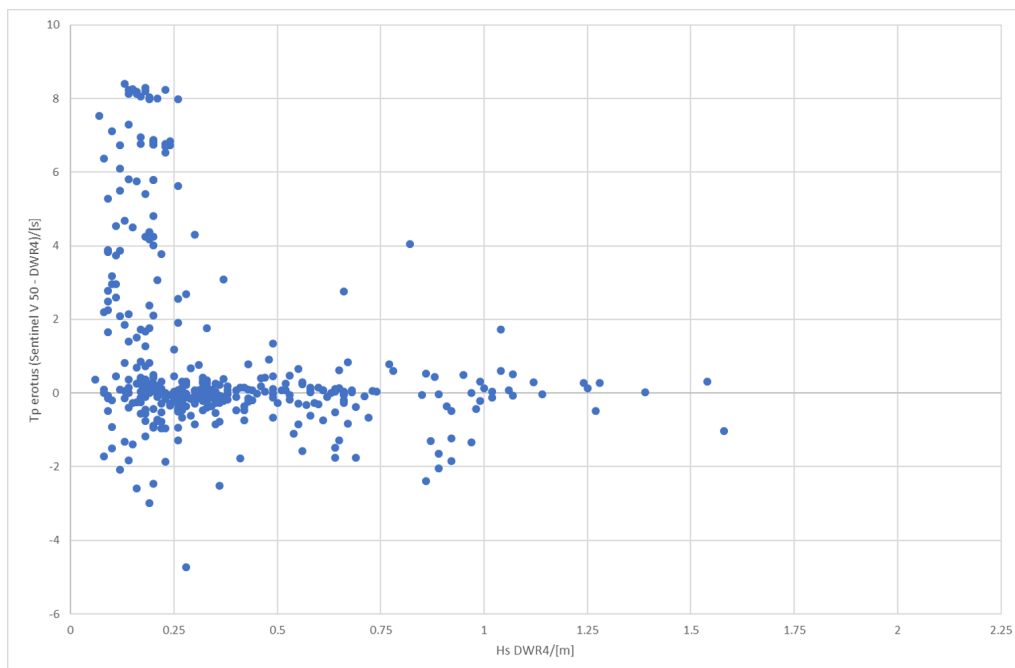
Vuoden 2018 mittalaitteiden huipun periodin suhteiden (Kuva 3.10) mittaukseen sovitettu suora viittaisi parempaan arvojen vastaavuuteen, mutta vertaamalla pelkkiä mittauksia (Kuvissa 3.9 ja 3.10) toisiinsa mielestäni havaintojen vastaavuus on ollut parempi vuonna 2017. Tämä regressiosuoran perusteella, parempi vastaavuus, on seurausta vuoden 2018 tiukemmista laaduntarkastuksen rajoista. Näiden rajojen takia lyhyen periodin aallot, joilla ADCP näyttää herkästi virheellistä arvoa, jäivät pois vertailusta vuonna 2018, mutta ovat osittain mukana vuoden 2017 vertai-

lussa. Edellä mainittujen tekijöiden takia huipun periodin vuosien välisistä eroista ei voida tehdä lopullisia päätöksiä.

Molempien vuosien mittausravojen vertailun (Kuvat 3.9, 3.10) perusteella näkyy, että ADCP:n havainnoissa on edelleen laaduntarkastuksenkin jälkeen kyseenalaisia huipun periodin arvoja, jolloin mittalaitteiden huipun periodin arvojen erotus on iso. Vuonna 2017, varsinkin ADCP:n 10 sekunnin luokan havainnot, kun aaltopoijun havainnot ovat olleet parin sekunnin luokkaa, ovat hyvin kyseenalaisia.

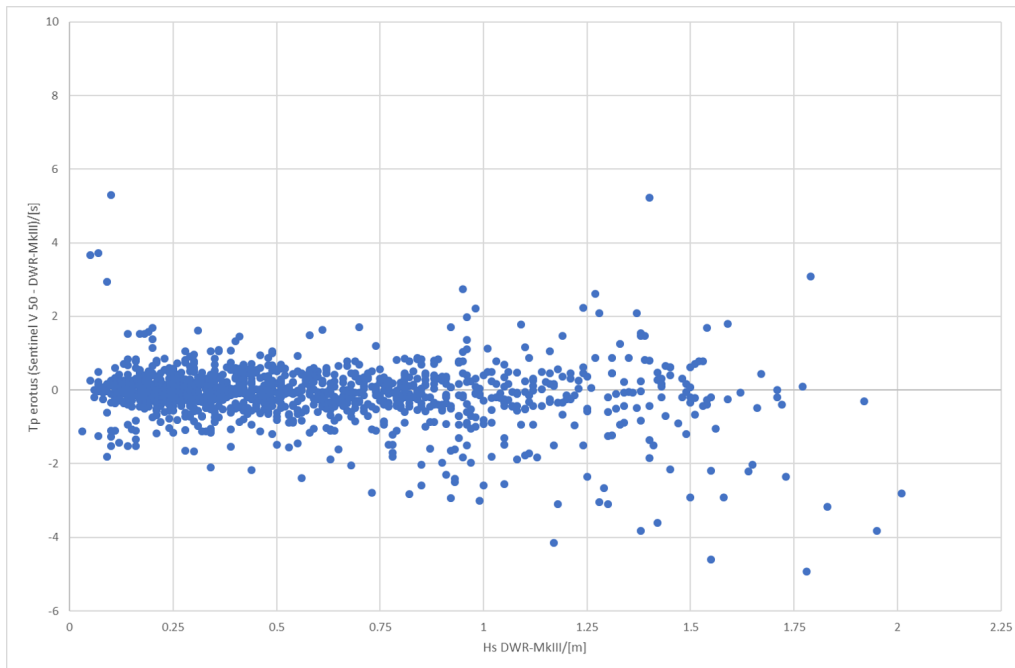
3.1.3 Merkitsevä aallonkorkeus ja huipun periodi

ADCP:n erotuskyvyä on arvioitu vertaamalla ADCP:n ja aaltopoijun huipun periodin erotusta suhteessa aaltopoijun mittaamaan merkitsevän aallonkorkeuden arvoon (Kuvat 3.11, 3.12).



Kuva 3.11: Vuoden 2017 huipun periodin erotus suhteessa aaltopoijun (DWR4) merkitsevään aallonkorkeuteen laatutarkastetuista havainnoista.

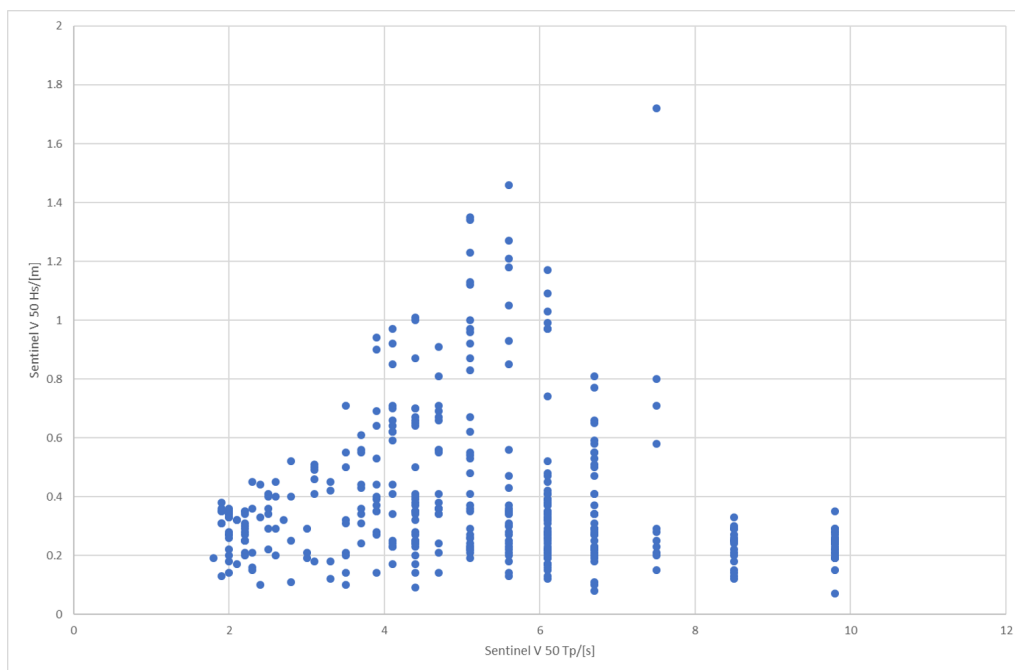
Tarkasteltaessa huipun periodia suhteessa merkitsevään aallonkorkeuteen vuoden 2017 havainnoissa (kuva 3.11) näemme, että huipun periodin erotuksen jakauma



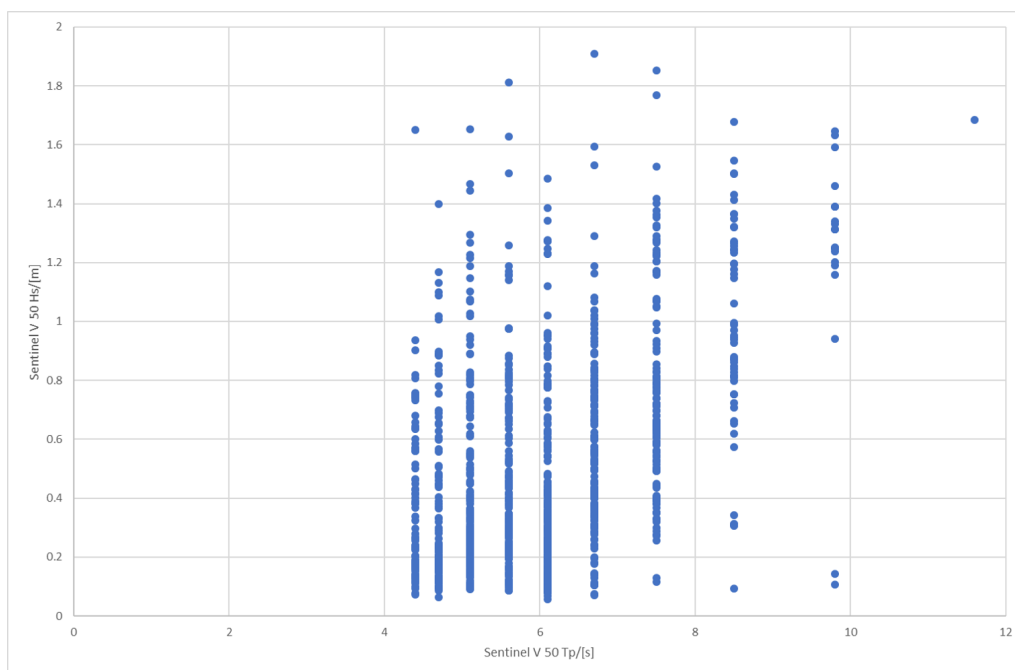
Kuva 3.12: Vuoden 2018 huipun periodin erotus suhteessa aaltopöijun (DWR4) merkitsevään aallonkorkeuteen laatutarkastetuista havainnoista.

on suurimmillaan alle 0,25 metrin merkitsevällä aallonkorkeudella. Tämä vahvistaa jo aikaisemmin (Kuva 3.2) havaitun ADCP:n aallokon mittausalarajan, kun mittalaite on asennettuna noin viiden metrin syvyyteen. Kun merkitsevä aallonkorkeus on yli 0,25 metriä, periodin erotus pysyy pääasiassa - 2 s ja 2 s välillä, kun sen alapuolella se vaihtelee paljon suuremmalla - 4 s ja 9 s välillä.

Vuoden 2018 vertailussa (kuva 3.12) ei ole yhtä selkeää merkitsevän aallonkorkeuden alarajaa, kuin vuonna 2017 oli havaittavissa. Tämä johtuu mahdollisesti vuosien välisistä laaduntarkastuksen eroista. Huipun periodin erotuksen jakauma yli yhden metrin merkitsevällä aallonkorkeudella on vuonna 2018 selkeästi isompi kuin vuonna 2017. Vuonna 2018 yli yhden metrin aallokolla periodin erotuksen jakauma on - 6 s ja 6 s välillä, kun vuonna 2017 se on - 2 s ja 2 s välillä. Tosin kuten aikaisemmin mainittiin ja kuvaajissa (3.11 ja 3.12) nähdään, vuonna 2017 oli merkitsevästi vähemmän havaintoja yhden ja kahden metrin merkitsevän aallonkorkeuden alueella kuin vuonna 2018.



Kuva 3.13: Vuoden 2017 ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevä aallonkorkeus suhteessa sen huipun periodiin laatutarkastetuista havainnoista.



Kuva 3.14: Vuoden 2018 ADCP:n (Sentinel V 50) merkitsevä aallonkorkeus suhteessa sen huipun periodiin laatutarkastetuista havainnoista.

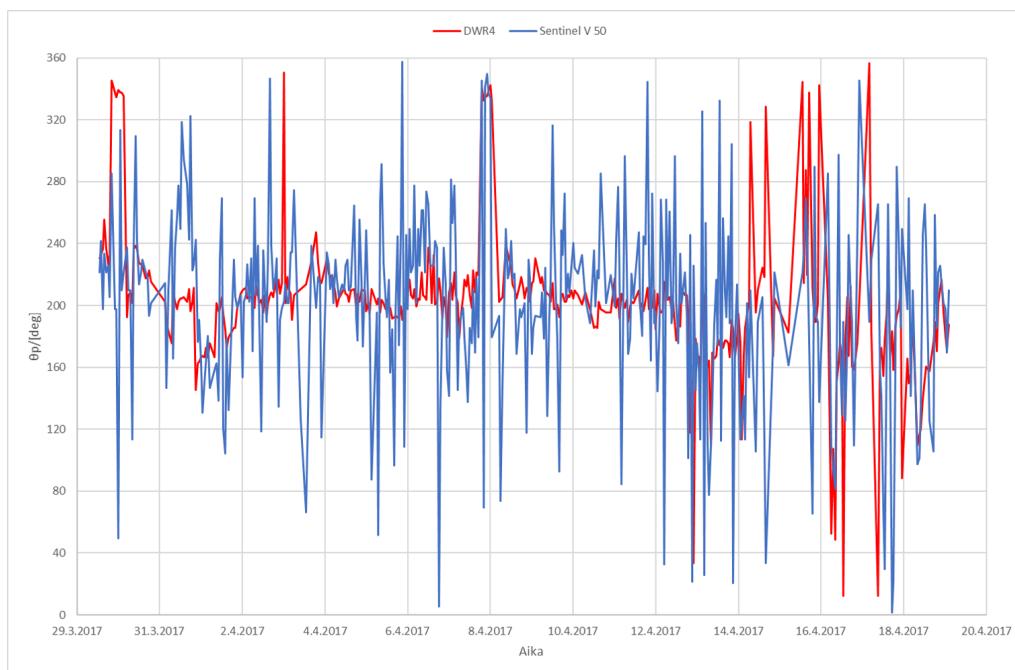
ADCP:n mittaamia merkitsevän aallonkorkeuden arvoja vertailtiin ADCP:n huipun periodin arvoihin (Kuvat 3.13, 3.14). Tarkasteltaessa ADCP:n merkitsevää aallonkorkeutta suhteessa sen huipun periodiin huomaamme, että vuosien 2017 ja 2018 havaintojen kuvaajat ovat muodoltaan hyvin erilaiset. Vuoden 2017 mittaukset muodostavat kolmion, kun taas vuoden 2018 arvot muodostavat suunnikkaan. Osittain vuosien välinen ero johtuu huipun periodin laaduntarkastuksen vuosittaisien rajojen eroista, minkä takia vuodelta 2018 puuttuvat kaikki alle neljän sekunnin periodit. Alue, jolle mittalaitteet asennettiin oli molempina vuosina sama, joten sillä ei ole merkittävää vaikutusta mittauksien vuosien välisiin eroihin. Havaintojen määrän erot, yli 1 metrin aallokolla vuosien välillä, aiheuttaa merkittävämmän eron kuvaajiin.

Vuonna 2017 (kuva 3.13) korkeimman merkitsevän aallonkorkeuden periodi on seitsemän sekunnin luokkaa, kun merkitsevä aallonkorkeus on noin 1,7 metriä. Tämä poikkeaa selkeästi muista kyseisen vuoden arvoista ja seuraavaksi korkeimpien aallokoiden huipun periodi on viiden ja kuuden sekunnin välillä. Vuonna 2017 suurin osa aallokosta on neljän ja kuuden sekunnin välillä olevaa aallokkoa. Vuonna 2018 (kuva 3.14) havainnot ovat jakautuneet tasaisemmin, eikä sen jakaumassa ole samanlaista piikkiä kuin vuonna 2017. Näemme, että yli 1,2 metrin aallokon huipun periodit ovat paljon laajemmalla välillä kuin vuonna 2017. Vuonna 2018 mittauksien arvot ovat neljän ja kymmenen sekunnin välillä, yhtäpoikkeusta lukuunottamatta, joka on vähän alle 12 sekuntia.

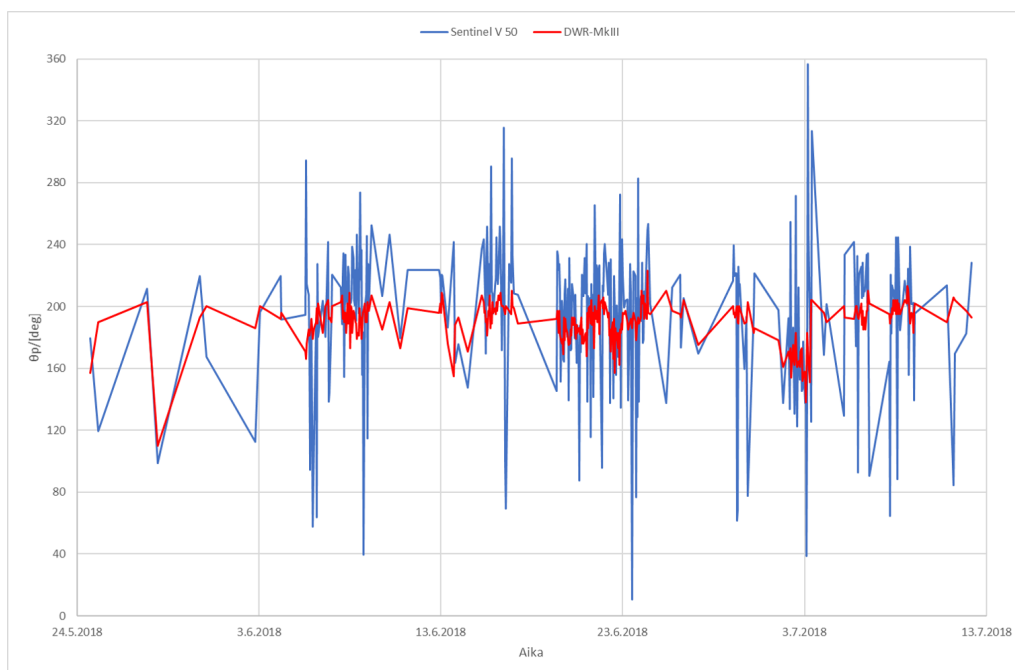
3.1.4 Aallokon suunta

ADCP:n mittaamia aallokon suunnan arvoja on arvioitu vertaamalla niitä aaltopoijun mittaamiin arvoihin (Kuvat 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19).

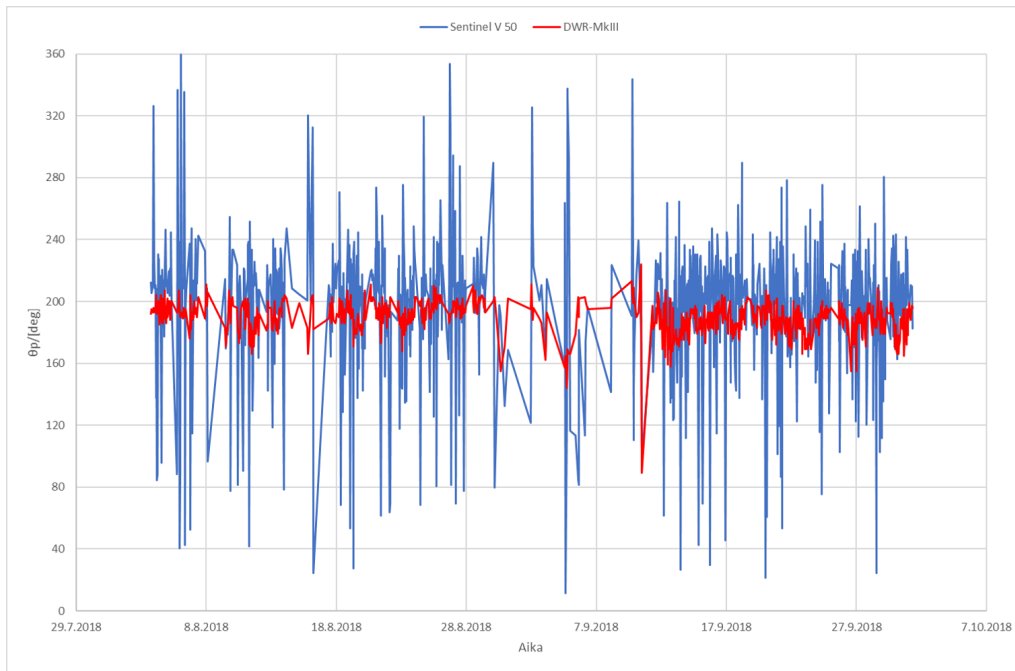
Aallokon suunnan aikasarjoissa (Kuvat 3.15, 3.16 ja 3.17) on selkeästi enemmän eroavaisuuksia aaltopoijun ja ADCP:n havainto arvojen välillä, kuin merkitse-



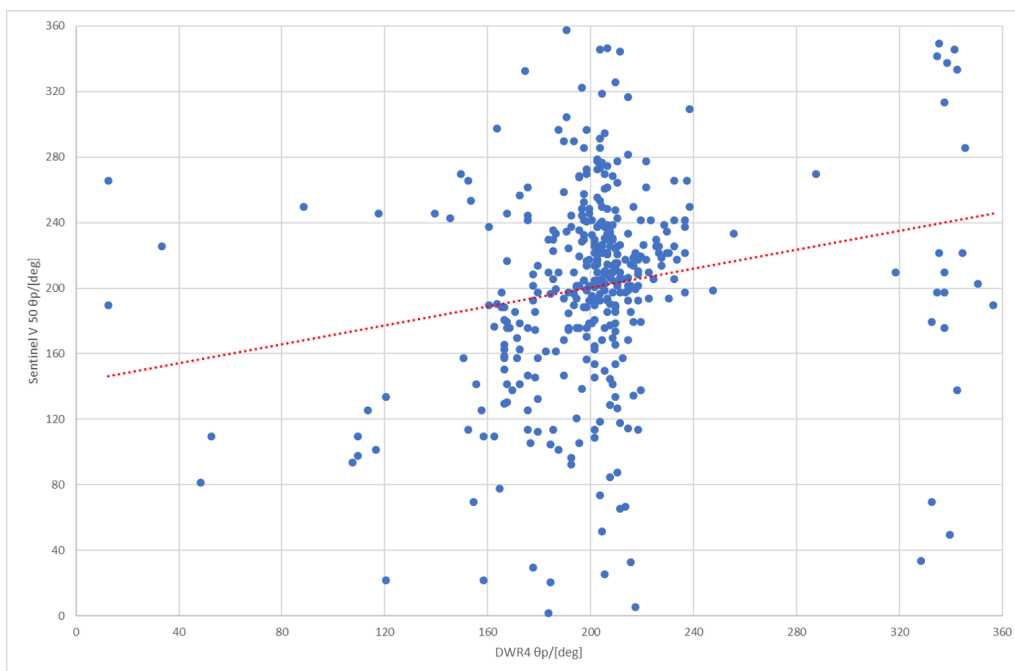
Kuva 3.15: Vuoden 2017 aaltopoijun (DWR4) ja ADCP:n (sentinel V 50) aallokon tulosuunnan aikasarja koko mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



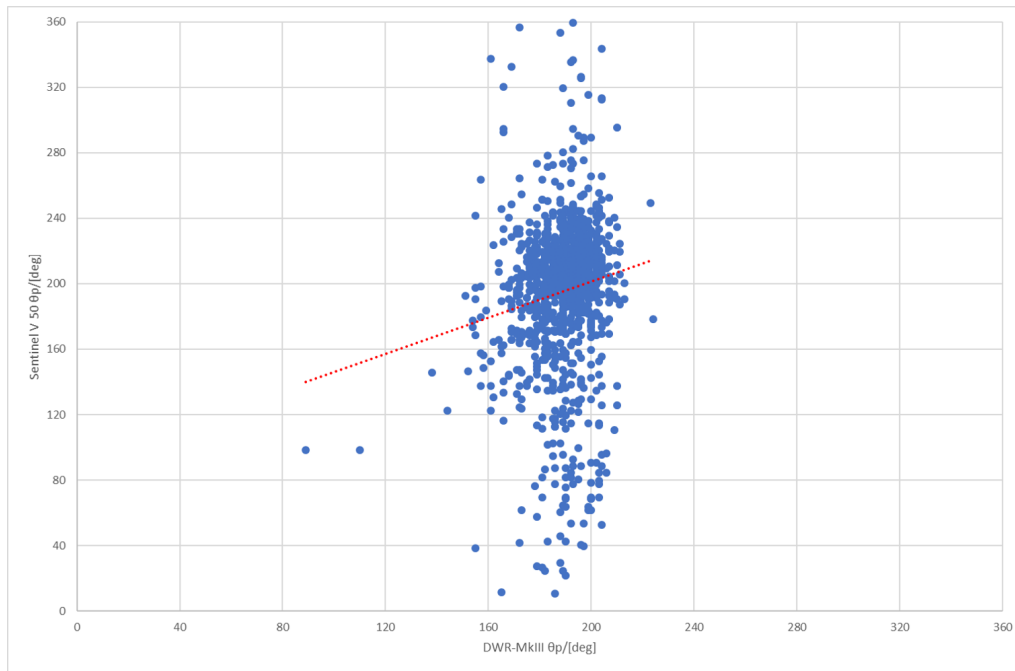
Kuva 3.16: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (sentinel V 50) aallokon tulosuunnan aikasarja 24.05. - 12.07.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.17: Vuoden 2018 aaltopoijun (DWR-MkIII) ja ADCP:n (Sentinel V 50) aallokon tulosuunnan aikasarja 30.07. - 01.10.2018 mittausjaksolta laaduntarkastuksen jälkeen.



Kuva 3.18: Vuoden 2017 ADCP:n (Sentinel V 50) aallokon tulosuunnan havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR4) aallokon tulosuunnan havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen katkonainen suora on lineaarinen trendi.



Kuva 3.19: Vuoden 2018 ADCP:N (Sentinel V 50) aallokon tulosuunnan havainnot suhteessa aaltopoijun (DWR-MkIII) aallokon tulosuunnan havaintoihin laaduntarkastuksen jälkeen. Punainen katkonainen suora on lineaarinen trendi.

vän aallonkorkeuden ja huipun periodin aikasarjoissa. Vuonna 2017 nähdään lyhyitä ajan hetkiä, jolloin mittalaitteiden mittaukset melkein vastaavat toisiaan. Aaltopoijun havainnot ovat suurimmaksi osaksi tulleet etelän suunnasta, kun taas ADCP:n havainnot vaihtelevat suuresti, eikä niissä ole samanlaista yhden suunnan hallitavuutta. Vuoden 2017 mittausjakson loppupuolella olleen ajanjakson aikana aallokon suunnan vaihtelu on ollut suurin molemmilla mittalaitteilla, tällöin merkitsevä aallonkorkeus on ollut koko ajan alle 0,3 metriä.

Vertailtaessa vuosien 2017 ja 2018 mittalaitteiden aallokon suunnan arvoja (Kuvat 3.18, 3.19) suhteessa toisiinsa nähdään, että vuoden 2017 havaintojakson aikana molempien mittalaitteiden aallokon suunnassa on vähän enemmän hajontaa, kuin vuonna 2018. Vuosien välinen ero mittalaitteiden havaitsemassa aallokon suunnassa on hyvin samanlainen, mutta kuten huipun periodin mittauksissa oli nähtävissä, ADCP:n aallokon suunnan arvot poikkeavat aaltopoijujen aallokon suunnan

havainnoista ajoittain merkittävästi. Koska aallokon suunta on huipun keskisuunta, niin on oletettavaa, että jos huipun periodit eivät vastaa toisiaan niin välttämättä ei suuntakaan vastaa.

Vuoden 2018 aallokon suunnan koko aikasarjassa nähdään vielä vähemmän yhteneväisyyttä mittalaitteiden aallokon suunnan mittausten välillä, kuin vuonna 2017. Tarkasteltaessa lyhyempää ajanjaksoa, voimme havaita joitain hetkellisiä yhteneväisyyksiä, mutta pääasiallisesti vastaavuudet ovat pieniä ja hetkellisiä. Vuonna 2018 nähdään aaltopoijun aallokon suunnan arvoissa, että etelästä tuleva aallokko on hallitseva ja vielä vuoden 2017 havaintojakin selkeämmin. Molemmista vuoden 2018 aallokon suunnan kuvaajista 3.16, 3.17 on selkeästi nähtävissä, että ADCP:n aallokon suunta vaihtelee paljon enemmän ja isommalla vaihteluvälillä kuin aaltopoijun suunta.

Varsinkin aaltopoijun aallokon suunnan mittaukset vuonna 2018 (kuva 3.19) ovat keskittyneet voimakkaasti $160 - 200^\circ$ välille, eli aallokko tulee pääasiallisesti kaakko-etelä-lounas suunnista. Vuonna 2018 ADCP:n arvot ovat myös suurimmaksi osaksi $160 - 240^\circ$ välillä, mutta havaintojen keskittyminen ei ole yhtä voimakasta kuin aaltopoijun havainnoissa. ADCP:n aallokon suunnan mittausarvoja on vuonna 2018 koko havaintoalueelta, mutta aaltopoijun kaikki mittaukset ovat $80 - 230^\circ$ välillä, eli käytännössä kaikki aallokko on tullut idän ja lounaan rajoittamasta suunnasta. Vuoden 2017 aaltopoijun aallokon suunnan havainnoissa (3.18) ei ole nähtävissä yhtä voimakasta mittausarvojen keskittymistä tietylle suunnalle kuin vuoden 2018 havainnoissa, mutta merkittävä osa havainnoista tulee kaakon ja lounaan rajaamalta alueelta.

3.1.5 Tilastolliset arvot

Tilastollisista arvoista (Taulukko 3.1) näemme, että mittalaitteiden vuoden 2017 merkitsevän aallonkorkeuden havaintojen keskiarvot ovat hyvin lähellä toisiaan, ero

0,02 m. Huipun periodin ja aallokon tulosuunnan keskiarvojen välillä erot ovat isommat, 0,9 s ja 7° . Huipun periodin ja aallokon tulosuunnan korrelaatiokertoimet eivät viittaa merkittävään yhteneväisyyteen mittalaitteiden havaintojen välillä tilastollisesti. Merkitsevän aallonkorkeuden korrelaatio on hyvä ja tilastollisesti vahva. Merkitsevän aallonkorkeuden positiivinen harha on pieni ja sen perusteella ADCP antaa tilastollisesti aaltopoijuja suurempia arvoja.

Vuoden 2018 havaintojen tilastollisissa arvoissa (Taulukko 3.2) merkitsevän aallonkorkeuden ja aallokon tulosuunnan keskiarvojen ero on suurempi kuin vuoden 2017 mittauksissa. Merkitsevän aallonkorkeuden harha on kasvanut ja se on negatiivinen, kun se vuonna 2017 oli positiivinen. Negatiivinen harha vahvistaa aikaisemmin (Kuvat 3.2, 3.3) tehdyn havainnon, että ADCP aliarvioi aallokon korkeutta suhteessa aaltopoijuun. Merkitsevän aallonkorkeuden korrelaatiokerroin on kuitenkin suunnilleen samaa luokkaa kuin vuonna 2017 ja se on edelleen tilastollisesti merkittävä.

Huipun periodin tilastolliset arvot vuonna 2018 ovat parantuneet vuodesta 2017 ja erityisesti korrelaatiokerroin on parantunut. Huipun periodin korrelaatio ei kuitenkaan edelleenkään ole tilastollisesti vahva. Muutokset huipun periodin tilastoarvoihin johtuvat osittain laaduntarkastuksen eroista vuosien välillä, mitkä taas olivat seurausta ADCP:n asennussyvyyden aiheuttamista rajoitteista. Aallokon suunnan korrelaatiokerroin on huonontunut edelleen vuodesta 2017, RMSE-arvo on pienentynyt ja harha on kaksinkertaistunut. Aallokon suunnan vastaavus mittalaitteiden havaintojen välillä on huonompi vuonna 2018, kuin vuonna 2017.

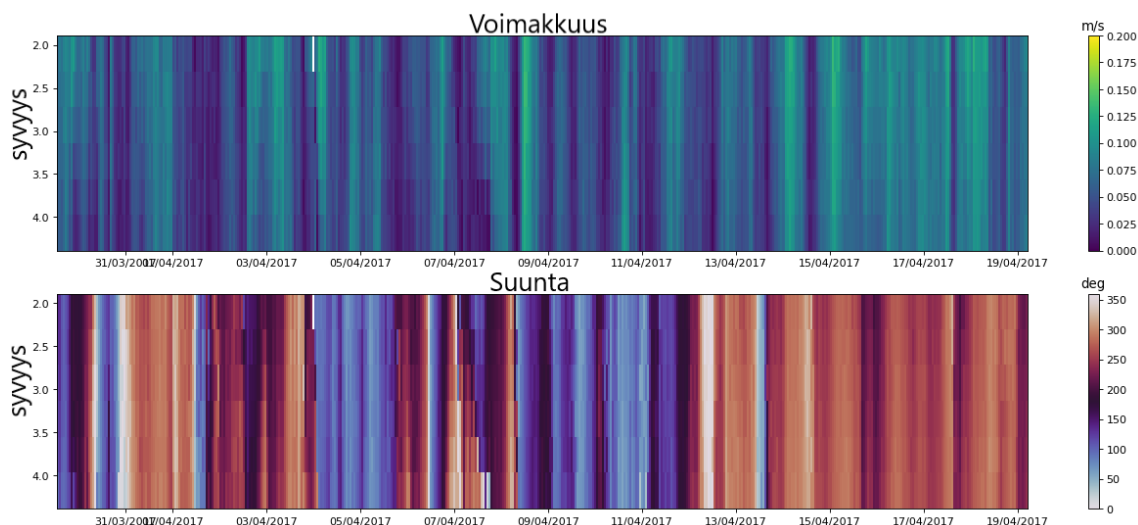
Taulukko 3.1: Tilastollisia suureita vuoden 2017 laatutarkastetuista aallokkohavainnoista.

parametri	keskiarvo	keskihajonta	RMSE	harha (ADCP - DWR)	korrelaatio- kerroin
Sentinel V 50 Hs	0,39 m	0,26 m	-	-	-
DWR4 Hs	0,37 m	0,27 m	-	-	-
Hs	-	-	0,06 m	0,03 m	0,9769
Sentinel V 50 Tp	5,2 s	2,1 s	-	-	-
DWR4 Tp	4,3 s	1,6 s	-	-	-
Tp	-	-	2,6 s	0,9 s	0,1533
Sentinel V 50 aallokon tulo- suunta	196 °	61 °	-	-	-
DWR4 aallokon tulosuunta	195 °	44 °	-	-	-
aallokon tulo- suunta	-	-	61 °	3 °	0,2056

Taulukko 3.2: Tilastollisia suureita vuoden 2018 laatutarkastetuista aallokkohavainnoista.

parametri	keskiarvo	keskihajonta	RMSE	harha (ADCP - DWR)	korrelaatio- kerroin
Sentinel V 50 Hs	0,51 m	0,36 m	-	-	-
DWR-MkIII Hs	0,60 m	0,40 m	-	-	-
Hs	-	-	0,13 m	-0,10 m	0,9742
Sentinel V 50 Tp	6,0 s	1,2 s	-	-	-
DWR-MkIII Tp	6,1 s	1,2 s	-	-	-
Tp	-	-	0,8 s	-0,1 s	0,7602
Sentinel V 50 aallokon tulo- suunta	195 °	46 °	-	-	-
DWR-MkIII aal- lokon tulosuunta	189 °	11 °	-	-	-
aallokon tulo- suunta	-	-	47 °	6 °	0,1366

3.2 Virtaukset



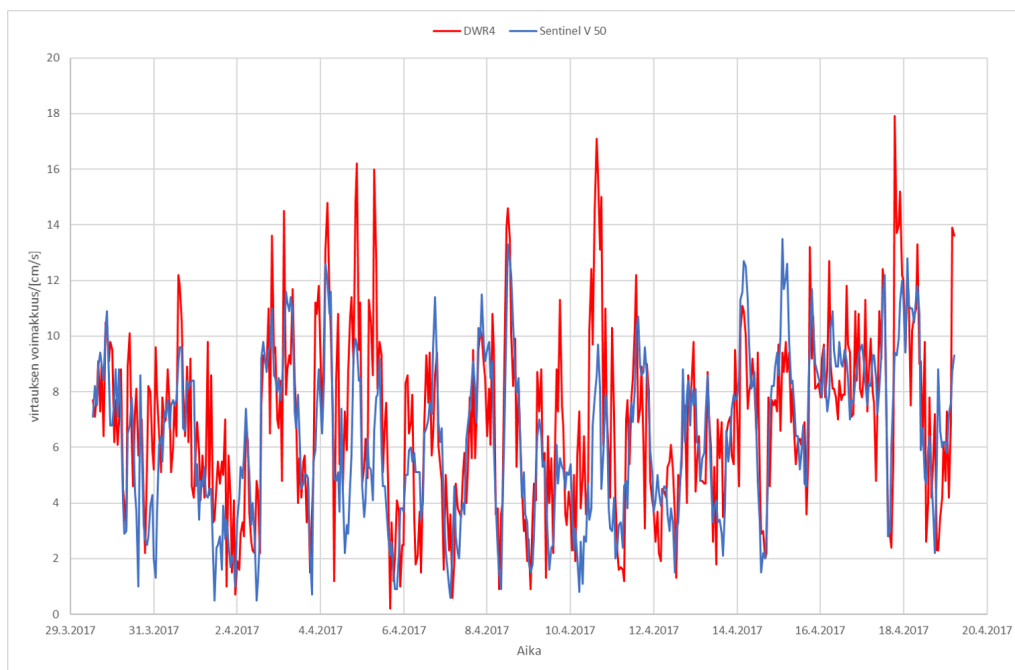
Kuva 3.20: Vuoden 2017 Sentinel V 50 laatutarkastetun virtauksen suunnan (alempi) ja suuruuden (yllempi) aikasarjat. Mittalaitteiden ilmoittama virtauksen suunta on etenemissuunta.

ADCP:n virtausprofiilien (Kuva 3.20) perusteella näemme, että suurimman osan mittausjakson ajasta virtauksen voimakkuus ja suunta ovat olleet vertikaalisti homogeenisia. Selkein poikkeama tästä on havaittavissa 7.4.2017, jolloin sekä virtauksen suunnassa että voimakkuudessa on selkeää kerrostuneisuutta 2.5 metrin matkalla. Hyvä vertikaalinen homogeenisuus parantaa vertailtavien mittalaitteiden havaintojen vastaavuuden todennäköisyyttä vaikka niiden mittausalueessa on pieni syvyysero.

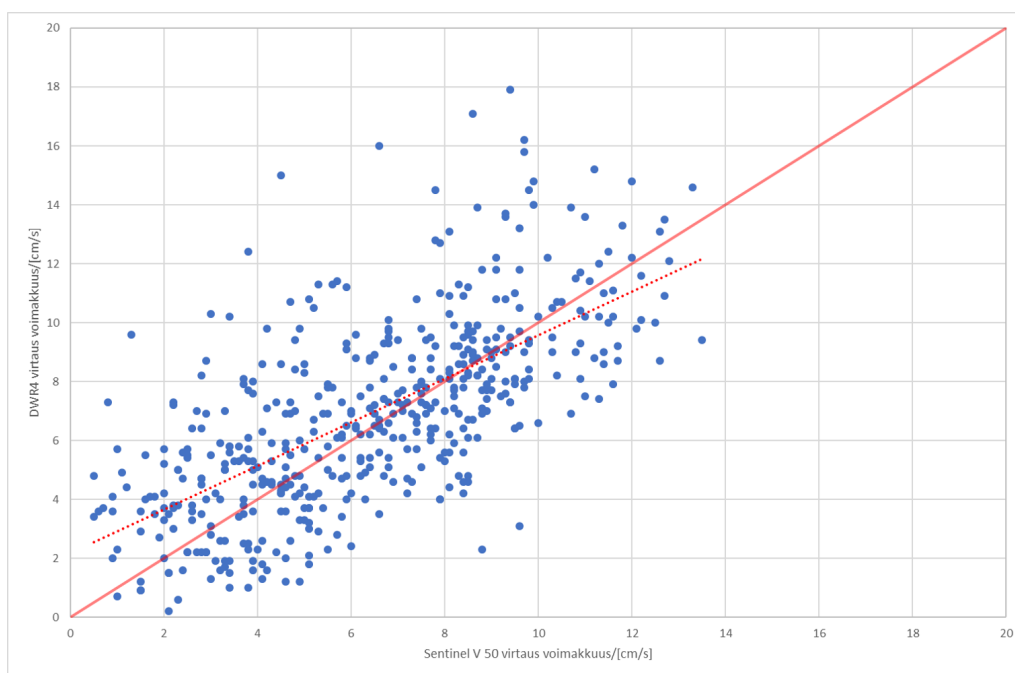
3.2.1 Virtauksen voimakkuus

Aaltopoijun mittaamia virtauksen voimakkuuden arvoja vertailtiin ADCP:n mittauksiin (Kuvat 3.21, 3.22), myös mittalaitteiden virtauksen erotuksia suhteessa aaltopoijun mittaamaan merkitsevään aallonkorkeuteen tarkasteltiin (Kuva 3.23).

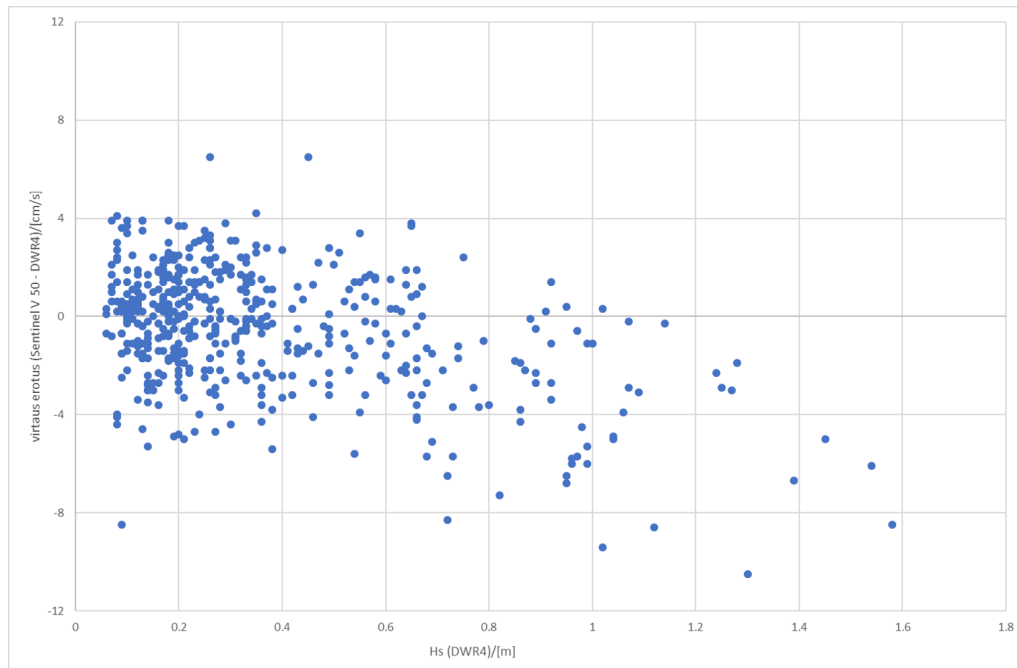
Aaltopoijun mittausjakson aikana havainnoimat pintavirtaukset ovat vähän suurempia kuin ADCP:n, mutta ero on pääsääntöisesti pieni ja havainnot ovat sa-



Kuva 3.21: Vuoden 2017 aaltopoijun (DWR4, 10 min) ja ADCP (Sentinel V 50) pintavirtauksen voimakkuuden aikasarja.



Kuva 3.22: Aaltopoijun (DWR4, 10 min) virtauksen voimakkuus suhteessa ADCP:n (Sentinel V 50) virtauksen voimakkuuteen. Punainen yhtenäinen suora on 1:1 viiva ja katkonainen on lineaarinen trendi.



Kuva 3.23: Mittalaitteiden virtauksen voimakkuuden erotus (Sentinel V 50 - DWR4, 10 min) suhteessa aaltopoijun (DWR4) merkitsevään aallonkorkeuteen.

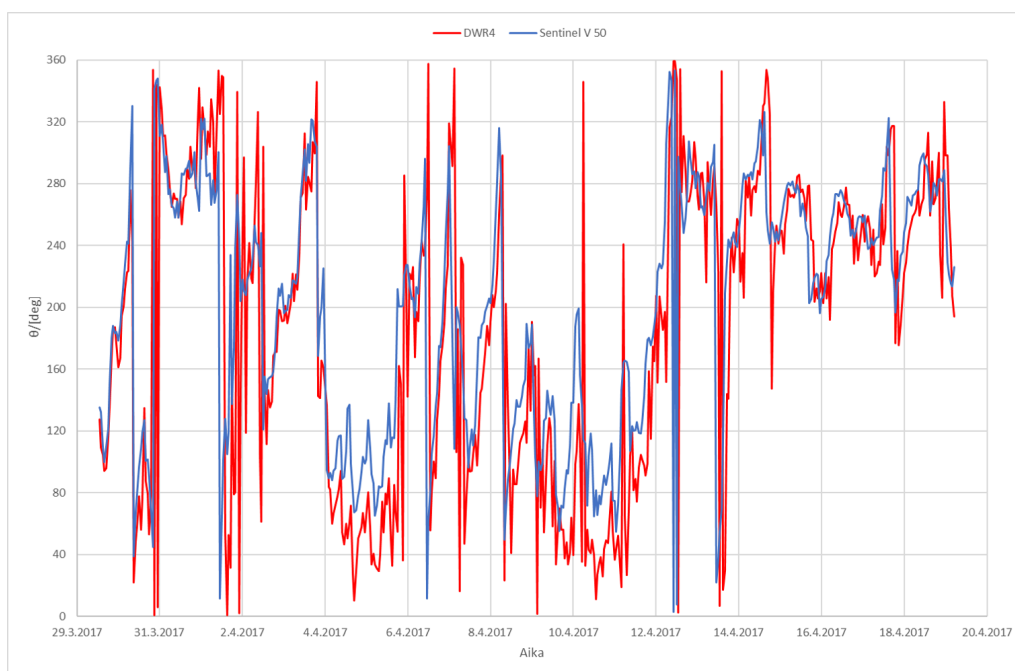
massa suuruusluokassa. Mittausarvojen perusteella aaltopoijun virtauksen voimakkuus vastaa suhteellisen hyvin ADCP:n voimakkuutta, muutamia selkeitä poikkeuksia lukuunottamatta. Nämä selkeät poikkeamat ovat, kun aaltopoijun havainnot ovat 2 - 2,5 kertaisia ADCP:n virtauksien voimakkuuksiin nähden. Useina, näinä hetkinä, merkitsevä aallonkorkeus on ollut vähintään yhden metrin tai enemmän. Tämän perusteella, mitä suurempi merkitsevä aallonkorkeus on, niin sitä suurempi on ADCP:n ja aaltopoijun pintavirtauksien voimakkuuden ero. Ajanjaksoina, jolloin erot voimakkuudessa ovat merkittävimpiä on vertikaalinen homogeenisuus ADCP:n virtausprofiilissa ollut hyvä. Monien näiden aaltopoijun mittaamien piikkien aikana ADCP:n virtauksen suunta on ollut suunnilleen itäänpäin, kun taas aaltopoijun on ollut keskimääräisesti kaakkoon.

Mittalaitteiden virtauksen voimakkuuden erotuksen jakauma on suurimmaksi osaksi arvojen - 4 ja 4 cm/s välillä, mutta kun merkitsevä aallonkorkeus kasvaa yli 0,6 metriin, niin erotuksen jakauma taipuu ja erotus kasvaa (Kuva 3.23). Tä-

mä on seurausta siitä, että aaltopoijun havaitsema virtauksen voimakkuus kasvaa enemmän isolla aallokolla, kuin ADCP:n. Mittalaitteiden virtauksien voimakkuuksien vertailu suhteessa toisiinsa (Kuva 3.22) osoittaa, että aaltopoiju, joko yliarvioi tai aliarvioi voimakkuutta, verrattuna ADCP:n havaintoihin. Mittausarvot ovat jakautuneet suhteellisen laajalle alueelle 1:1 viivan ympäristöön, eivätkä ne muodosta voimakasta vastaavuutta.

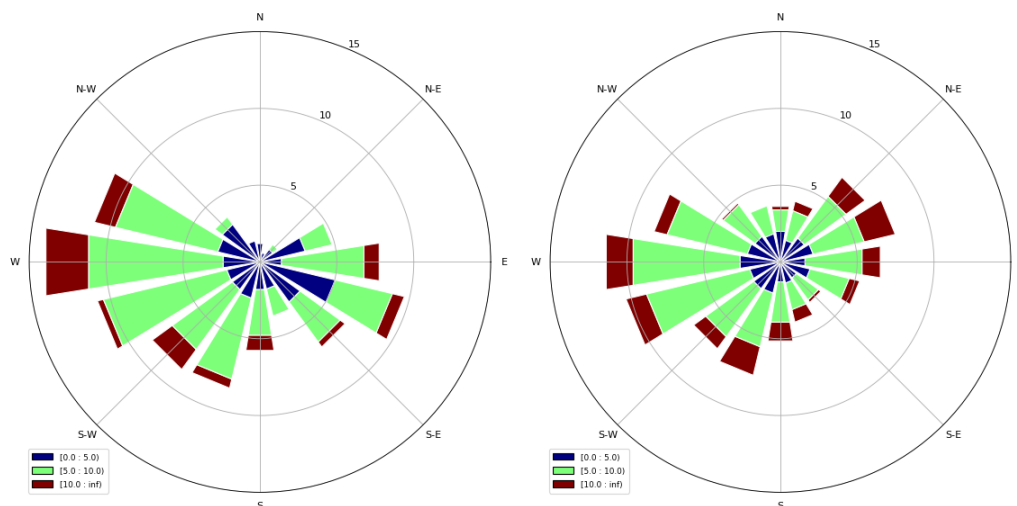
3.2.2 Virtauksen suunta

Aaltopoijun mittaamia virtauksen suuntia on arvioitu vertaamalla niitä ADCP:n mittaamiin ylimmän virtaussolun virtauksen suunnan arvoihin (Kuvat 3.24, 3.25, 3.26).

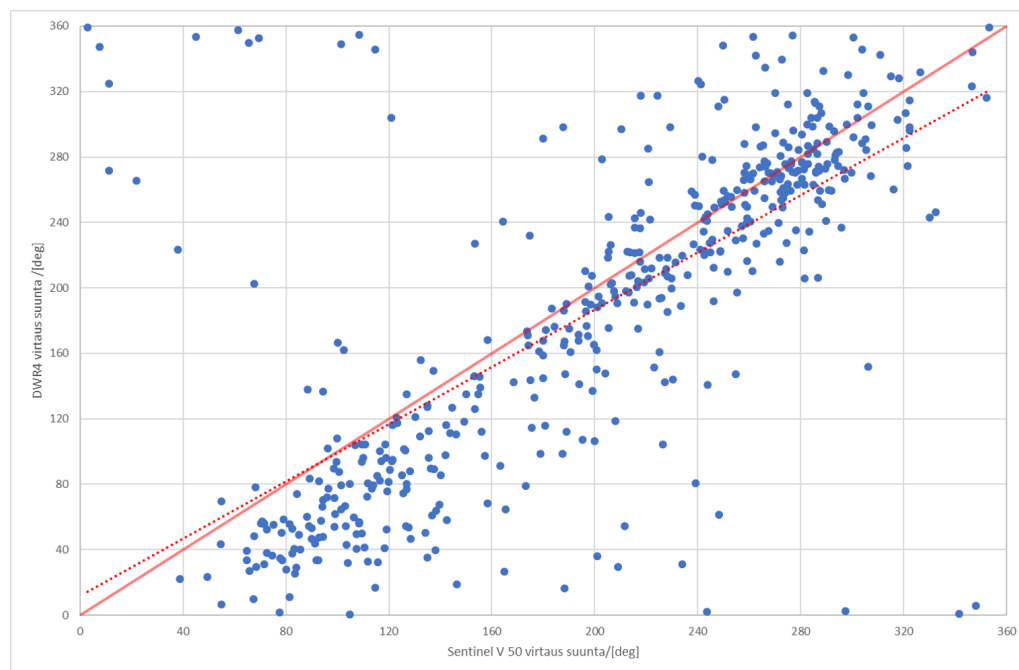


Kuva 3.24: Vuoden 2017 aaltopoijun (DWR4, 10 min) ja ADCP (Sentinel V 50) pintavirtauksen suunnan aikasarja.

Virtauksen suunta vastaa aaltopoijun ja ADCP:n havainnoissa toisiaan suhteellisen hyvin (Kuva 3.24) varsinkin silloin, kun molempien havaitsemat virtauksien voimakkuudet ovat suunnilleen samat. Virtauksen suunnan vertailussa havain-



Kuva 3.25: Sentinel V 50 virtausruusu vuoden 2017 ylimmän syvyyssolun havainnoista (vasen) ja DWR4 aaltopoijun virtausruusu (oikea).



Kuva 3.26: Aaltopoijun (DWR4, 10 min) virtauksen suunta suhteessa ADCP:n (Sentinel V 50) virtauksen suuntaan. Punainen yhtenäinen suora on 1:1 viiva ja katkonainen on lineaarinen trendi.

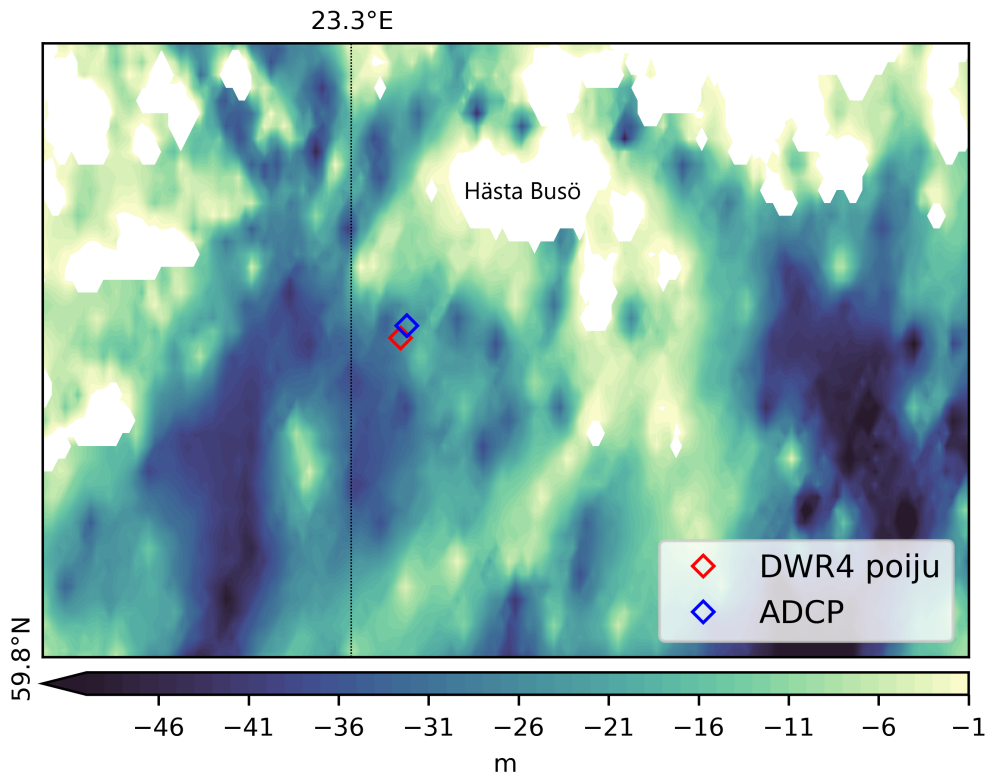
not vastaavat toisiaan paremmin kuin virtauksen voimakkuuden vertailussa. Varsinkin mittausjakson lopussa olleella aikavälillä havaintojen vastaavuus on ollut hyvä ja tällöin aallokko on ollut pientä. Pintavirtauksien ADCP:n suunnassa vallitseva

virtaus on (Kuva 3.25 vasemmalla) virtausruusun perusteella länteen ja sen ympäristöön. Aaltopoijun (Kuva 3.25 oikealla) vallitsevan virtauksen suunta on enemmän länsi-lounas suuntaan ja se ei ole yhtä voimakkaasti keskittynyt kuin ADCP:llä.

Tarkasteltaessa yksittäisiä mittalaitteiden virtauksen suunnan havaintoja suhteessa toisiinsa on havaintojen välillä suuriakin eroja, vaikka kokonaisuutta katsottaessa arvojen vastaavuus on hyvä (Kuva 3.26). Mittalaitteiden mittaamien suuntien vertailuun sovitettu suora on suhteellisen lähellä 1:1 viivaa. Havainnoissa on muutamia hyvin kyseenalaisia arvoja, jotka osaltaan vaikuttavat suuresti sovitettuun suoraan ja havaintojen vastaavuuteen. Tämän perusteella mittalaitteiden mittaamat suunta-arvot vaatisivat lisää laaduntarkastusta.

Mittalaitteiden asennuspaikan (Kuva 3.27) pohjoispuolella on selvästi matalampaa, 1 - 10 m, tämä selittää miksi mittalaitteiden havainnossa ei ollut merkittävästi arvoja luoteen ja kaakon välisellä akselilla. Myös alueen itäpuolella on matalampi alue, noin 16 m, jolloin syvyystietojen perusteella vapaaksi virtaussuunnaksi jää vain etelän ja kaakon välinen akseli. Molempien mittalaitteiden virtauksen suunnan havainnoista suurin osa on tuolta edellä mainitulta alueelta.

DWR4 aaltopoiju mittaa virtausta noin yhden metrin syvyydellä pinnasta, kun Sentinel V 50 ADCP mittaa virtausta vähän syvemmältä, noin 1,4 - 2,4 metrin syvyydellä pinnasta. Havaitut erot virtauksen voimakkuudessa ja suunnassa johtuvat osaksi tästä mittalaitteiden mittaussyvyyden erosta. Sillä tuulen aiheuttama pintavirtaus heikkenee ja kääntyy oikealle syvyyden kasvaessa Ekmanin spiraalin mukaan. Teoreettisten arvojen perusteella mittausta paikan alueella virtaus kääntyisi $4,5^\circ$ jokaista alkavaa metriä kohden. Aaltopoijun ja ADCP:n bias on -15° , mikä on yli kolminkertainen verrattuna teoreettiseen arvoon ja todellinen Ekmanin spiraalista johtuva kääntymisen on todennäköisesti vielä pienempää.



Kuva 3.27: Vuoden 2017 mittalaitteiden asennusalueen ja lähiympäristön syvyystietokartta (syvyystiedot EMODnet:istä).

3.2.3 Tilastolliset arvot

Virtauksen tilastolliset arvot (Taulukko 3.3) vahvistavat, että mittalaitteiden virtauksen voimakkuuden ja etenemissuunnan keskiarvot ovat samankaltaiset. Korrelaatiokertoimet eivät kuitenkaan viittaa tilastollisesti vahvaan yhteneväisyyteen mittalaitteiden havaintojen välillä. Korrelaatiokertoimien mukaan virtauksen suunnan vastaavuus on parempi kuin voimakkuuden vastaavuus. Virtauksen voimakkuuden bias on positiivinen ja johtuu osittain siitä, että aaltopoijun (DWR4) mittausalue on lähempänä pintaa kuin ADCP:n (Sentinel V 50). Vastaavasti virtauksen suunnan harha on negatiivinen, eikä se voi olla seurausta pelkästään mittalaitteiden keskimäärin yhden metrin mittaussyvyys erosta.

Koska aaltopoijun mittaukset ovat 10 minuutin keskiarvoja ja ADCP:n ovat

20 minuutin keskiarvoja, niin tarkasteltiin myös, vaikuttaako havaintojen vastaavuuteen kahden peräkkäisen aaltopoijun mittausjakson keskiarvon vertaaminen ADCP:n arvoihin. Tilastollisissa arvoissa on pientä paranemista ja myös aikasarjoissa oli nähtävissä sama, mutta siellä missä erot olivat isoimmat, ne itse asiassa kasvoivat lisää. Tämän perusteella yleisesti ottaen tuloksien vastaavuus ei parantunut vaan se jopa vähän heikkeni, kun tarkasteltiin aaltopoijun kahden peräkkäisen mittausjakson keskiarvoja ADCP:n havaintoihin.

Taulukko 3.3: Tilastollisia suureita vuoden 2017 virtaushavainnoille

parametri	keskiarvo	keskihajonta	RMSE	harha (DWR - ADCP)	korrelaatio- kerroin
Sentinel V 50 voimakkuus	6,4 cm/s	2,9 cm/s	-	-	-
DWR4 voimak- kuus (10 min)	6,9 cm/s	3,2 cm/s	-	-	-
DWR4 voimak- kuus (20 min)	6,8 cm/s	3,0 cm/s	-	-	-
virtauksen voimakkuus (DWR4 10 min)	-	-	2,5 cm/s	0,5 cm/s	0,6703
virtauksen voimakkuus (DWR4 20 min)	-	-	1,1 cm/s	-0,5 cm/s	0,7201
Sentinel V 50 suunta	200 °	80 °	-	-	-
DWR4 suunta (10 min)	186 °	98 °	-	-	-
DWR4 suunta (20 min)	188 °	92 °	-	-	-
virtauksen ete- nemissuunta (DWR4 10 min)	-	-	43 °	-15 °	0,7520
virtauksen ete- nemissuunta (DWR4 20 min)	-	-	44 °	-14 °	0,8344

4. Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin ADCP:n aallokkohavaintojen luotettavuutta sekä tutkittiin, että minkälaisilla reunaehdoilla mittaukset olisivat käytettävissä. Lisäksi vertailtiin aaltopoijun ja ADCP:n pintavirtaushavaintoja toisiinsa.

ADCP:n mittaama merkitsevä aallonkorkeus vastaa hyvin aaltopoijun mitaamia arvoja. Korrelaatiokerroin, 0,97, kertoo tilastollisestikin merkittävästä vastaavuudesta. Tuloksista näkyi kuitenkin selvästi, että pienempi aallokko, alle 0,25 metriä, on ADCP mittauksilla vaikeasti havaittavissa. Merellä vallitsevien aaltoolosuhteiden osalta yhteiskunnallisesti merkittäviä käyttäjiä, meriliikenne ja rakentaminen, ovat useimmiten kiinnostuneet kovemmista aallokko-oloista, minkä seurauksena pienten arvojen etätarkkuus ei ole mittausten käytettävyyden kannalta merkittävä tekijä.

ADCP:n asennussyvyyden kasvaessa noin 5 metristä noin 35 metriin havaittiin tuloksien analyysin perusteella, että 35 metrin syvyydelle ankkuroitu ADCP aliarvioi selvästi aallokkoa. Asennussyvyyden kasvattaminen aiheuttaa myös laaduntarkastuksessa poistettavien arvojen määrän melkein kaksinkertaistumisen. ADCP aliarvioi merkitsevää aallonkorkeutta melko systemaattisesti, joten arvoja voitaisiin teoriassa korjata korjauskertoimen avulla lähemmäksi aaltopoijun mitaamia arvoja. Tämä on kuitenkin hyvin haastavaa, sillä korjauskerroin on riippuvainen muun muassa käytettävästä mittalaitteesta, asennuspaikasta, laitteen asennussyvyydestä ja mahdollisesti ajallisista muutoksista. Korjauskertoimen määrittäminen ADCP:lle

vaatisi myös vertausmittausten tekemisen aaltopoijulla halutulla asennuspaikalla.

Yleistäen molempien vuosien tulosten analyysin perusteella ADCP:n merkitsevän aallonkorkeuden havaintojen alarajana voidaan käyttää 0,5 metriä. Tämä tulos vastaa ADCP:n laitevalmistajan ilmoittamia mittalaitteen havaintorajoja ja suurin osa aalto-olosuhdetietoja hyödyntävistä yhteiskunnallisista toimijoista ei ole kiinnostunut alle 0,5 metrin aallokosta. Tämä tulosten perusteella saatu havaintoalaraja on tyydyttävä tulos ja jäljelle jäävien havaintojen laatu on hyvä.

Tässä tutkielmassa saadut tulokset vastaavat aikaisempien kansainvälisten tutkimuksien (Rorbaek ja Andersen, 2000) löydöksiä, joissa merkitsevän aallonkorkeuden vastaavuus on hyvä ja huipun periodin ja suunnan käytettävyys on huono. Myös korrelaatiokertoimien perusteella huipun periodin ja suunnan vastaavuus on tilastollisesti yleisesti merkityksetön, paitsi 2018 periodin, oli selvä. Huipun suunnan vastaavuutta pitäisi pystyä parantamaan, sillä olisi tärkeää tietää, mistä suunnasta aallokko on tulossa. Huipun suunnan tuloksien vastaavuuden parantamista edes auttaisi spektrien tarkempi analysointi.

Aaltopoijun ja ADCP:n virtauksen voimakkuudessa ja suunnassa on havaittavissa vastaavuutta. Virtauksen voimakkuuden bias ($DWR - ADCP$) on 0,5 cm/s, mutta yksittäisinä hetkinä aaltopoijun mittaukset ovat yli kaksinkertaisia verrattuna ADCP:n havaintoihin. Suunnan bias on -15° ja jos virtauksen voimakkuudet vastasivat, myös suunnan vastaavuus on pääasiassa silloin hyvä. Erot eivät ole selitettävissä pelkällä mittaussyvyyden erolla, joka on keskimäärin yksi metri. Virtauksen suunnan kääntyminen on kolminkertainen verrattuna teoreettiseen Ekman spiraalin perusteella laskettuun kääntymiseen.

ADCP:n havainnot ovat 20 minuutin keskiarvoja, kun aaltopoijun mittaukset ovat 10 minuutin keskiarvoja. Vaikka aaltopoijun mittauksia tarkasteltiin kahden peräkkäisen 10 minuuttisen keskiarvoina ja niitä verrattiin ADCP:n arvoihin, niin vastaavuus ei parantunut. Vastaavuus parani alle 0,75 metrin aallokolla, mutta sitä

suuremmilla voimakkuuden erot itse asiassa kasvoivat.

Aaltopoijun virtaushavainnot ovat osittain vastaavia ja samassa suuruusluokassa ADCP:n havaintojen kanssa, joten sen perusteella ne tarjoaisivat kiinnostavan ja hyvän lisän pintavirtaushavaintoihin. Yli 1 m ja sitä suuremman, aallokonaikaiset mittaukset vaatisivat tarkempaa analysointia.

Kiitokset

Kiitokset Laura Tuomelle pro gradu tutkielmani ohjauksesta, kommentoinnista ja tarkastuksesta. Kiitokset kaikille muillekin Ilmatieteen laitoksella, jotka ovat autaneet, tukeneet ja kannustaneet minua tehdessäni tutkielmaani. Kiitokset monista mielenkiintoisista keskusteluista. Kiitos myös äidilleni Mirja Jallille tutkielmani oikolukemisesta.

Kirjallisuus

- Witting, R. J. (1912). *Hydrografis-biologiset merentutkimukset vuonna 1911 - selontekeo*.
- Work, P. A. (2008). "Nearshore directional wave measurements by surface-following buoy and acoustic Doppler current profiler". *Ocean Engineering* 35(8-9), s. 727–737.
- Alenius, P. (1983). "An example of a velocity jump across the summer thermocline". *Geophysica* 20(1), s. 81–87.
- Alenius, P., K. Myrberg ja A. Nekrasov (1998). "The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review". *Boreal Environment Research* 14(1), s. 97–125.
- Datawell (2012). *Datawell Technicalnote Comparison MkIII and DWR4*. Tekninen raportti.
- (2014). *Datawell Waverider Reference Manual DWR-MkIII*.
- (2018). *Datawell Waverider Manual DWR4*.
- Haavisto, N. (2015). *ADCP:n käyttö aaltomittarina Itämerellä*.
- Joosten, H. P. (2013). *Datawell 1961 - 2011 Riding the Waves for 50 years*. Drukkerij Gravé, Heemstede.
- Kanarik, H. (2018). *ADCP virtausmittausten laaduntarkastusmenetelmien kehittäminen ja soveltaminen Saaristomerellä*.
- Korhonen, O. (1971). *Alustava selvitys Loviisan Hästholmsfjärdenin virtausmittauksista 1971*.

- Maanmittauslaitos (2020). *Karttapaikka*. Online. 19.2.2020.
- Nortek (2018a). *Principles of Operation*.
- (2018b). *The Comprehensive Manual for ADCP's*.
- (2020). *Signature 500 Technical Specifications*. Online. 10.5.2020.
- Rorbaek, K. ja H. Andersen (2000). "Evaluation of Wave Measurements with an Acoustic Doppler Current Profiler". In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition* volume 2, s. 1181–1187.
- Schlitzer, R. (2019). *Ocean Data View*. <https://odv.awi.de>.
- Strong, B., B. Brumley, E. A. Terray ja G. W. Stone (2000). "The Performance of ADCP-Derived Directional Wave Spectra and Comparison with Other Independent Measurements". In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition* volume 2, s. 1195–1203.
- Teledyne (2013). *Velocity Software user's guide*.
- (2015). *Sentinel V Technical Specifications*.
- (2016). *Sentinel V Waves Array Datasheet*.
- (2020). *Waves Primer: Wave Measurements and the RDI ADCP Waves Array Technique*. Online. 10.5.2020.
- Terray, E. A., B. H. Brumley ja B. Strong (1999). "Measuring Waves and Currents with an Upward-Looking ADCP". *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference*, s. 66–71.
- Terray, E., R. L. Gordon ja B. Brumley (1997). "Measuring Wave Height and Direction Using Upward-Looking ADCPs". In *OCEANS '97 MTS/IEEE Conference Proceedings* volume 1, s. 287–290.
- Tuomi, L., K. K. Kahma ja H. Pettersson (2011). "Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea". *Boreal Environment Research* 16(6), s. 451–472.
- Virtaustutkimuksen neuvottelukunta (1979). *Saaristomeren virtaustutkimus*.